

室内環境下における太陽電池性能評価法の確立と低照度室内光シミュレータの開発

著者	斎藤 英純
その他のタイトル	Establishment of the Evaluation Method for Photovoltaics under indoor Light Conditions and Development of the Indoor Light Simulator with Low Illuminance
学位授与年度	平成30年度
学位授与番号	17104甲生工第336号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00007203

2018（平成 30）年度

室内環境下における太陽電池性能評価法の確立と
低照度室内光シミュレータの開発

九州工業大学 大学院生命体工学研究科
生命体工学専攻 博士後期課程

指導教官：早瀬修二教授

15899008 齋藤英純

目次

第 1 章	序論	1
1-1	研究背景	1
1-2	研究の目的	4
1-3	論文の構成	6
第 2 章	色素増感太陽電池の分光感度測定法	7
2-1	はじめに	7
2-2	使用した DSC セルおよび短絡電流密度の算出	9
2-3	単色光を連続照射させた際の電流応答とインピーダンス測定	10
2-4	DC 法による分光感度測定	14
2-5	パルス照射された単色光に対する電流応答	16
2-6	AC 法による分光感度測定	18
2-7	チョッピング周波数の影響	19
2-8	白色バイアス光強度の影響	22
2-9	まとめ	24
第 3 章	室内低照度環境下における太陽電池評価	25
3-1	はじめに	25
3-2	商用交流電源を使用した市販照明器具の照度測定	26
3-3	交流電源で駆動する照明下における I-V 測定	32
3-4	調光機能付き LED 照明器具の照度測定と I-V 測定	35
3-5	低照度 LED 室内光シミュレータの開発	40
3-6	低照度 LED 室内光シミュレータによる実使用環境の再現試験	49
3-7	太陽電池の発電性能評価	56
3-8	まとめ	59

第 4 章	ペロブスカイト太陽電池の発電性能評価	60
4-1	はじめに	60
4-2	環境制御試験槽と搬送容器の作製	62
4-3	マルチチャンネル同時測定ソースメーターの作製	67
4-4	まとめ	71
第 5 章	結論および今後の展望	72
5-1	結論	72
5-2	今後の展望	74
参考文献	.....	75
発表論文	.....	77
学会発表	.....	78
国際会議	.....	79
特許および実用新案	.....	80
謝辞	.....	81

第 1 章 序論

1-1 研究背景

現在、我々が社会活動するエネルギーとして石油、石炭、天然ガスといった化石燃料が多く利用されており、これらの化石燃料が燃焼する際に発生する二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物などが大気中に放出されることで地球温暖化や大気汚染を引き起こすとされている。このような環境問題に対応して温室効果ガスの抑制が世界中で行われており、日本における温室効果ガス排出量の 2030 年度目標値は、エネルギー起源二酸化炭素の排出量について、2013 年度比 -25.0%（2005 年度比 -24.0%）となっている[1]。

温室効果ガスの排出を抑制するにはバイオ燃料、太陽光発電、風力発電などの自然エネルギーの利用量を増やすことが必要となる。図 1-1-1 に示すとおり、太陽光発電の占める割合は年々増加しており、このまま太陽光発電の比率を増やしていくことが温室効果ガスの排出抑制に最も効果があると考えられる[2]。実際、太陽電池の発電電力は 2016 年に 40GW を超え、日本の全原子力発電所の発電量を上回っている。このように年々普及が拡大している太陽光発電ではあるが、図 1-1-2 に示すように日本で使用する全電力に占める割合は 5.7% でしかない[2]。また、現在の太陽光発電は各家庭への屋根やメガソーラーなど日当たりの良い場所での使用が主である。さらなる普及を目指すには山間部や北向きの壁など低照度環境における使用が拡大し、全体を底上げするような状況が望ましい[3]。

色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池といった有機太陽電池は、結晶シリコン太陽電池と比較して低照度でも変換効率が低下しにくく、使用する材料の選択により、低い照度に発電効率のピークを調節することも可能という特徴を有するため、屋内外を問わず低照度環境での普及拡大が期待されている。例えば、山間部に設置する通信機器や橋梁の破損モニタなどに太陽電池を応用すれば電気設備の工事が不要で設置するだけで使用できる。

屋外だけでなく、室内の人工照明下での使用として、各種人感センサー、通信機器用電源などの応用にも検討が進められている。ここ数年、高齢者の一人暮らしを遠隔でサポートするサービスが広がりを見せている。このような遠隔サポートには小型通信機器が不可欠である。今後 IT 機器の需要は増加の一途を辿るものと予想されるが、小型通信機器の電源としては、交換の手間がかからず、停電時にも使用できる太陽電池はとても有効である。そして、室内における照度は、数十～数百 lx 程度と、有機太陽電池に最も適した環境といえる。

その他、災害発生時に使用される誘導灯や手元灯などにも太陽電池を利用したものが増

えている。停電発生時などには「置くだけで使える灯り」というのは高齢者や子供にも安心して使えるため非常に有用である。

著者が勤務する地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所（KISTEC）が加盟している有機系太陽電池技術研究組合（RATO）でも、2017年2月に、前年の熊本地震で甚大な被害を受けた熊本市や益城町へ行って自治体への聞き取り調査を行ったところ、「山間部での崩落現場や地割れの発生した道路に使用したい。」との回答を得た。

RATOは有機太陽電池を利用した緊急時自発光誘導デバイス（E-SEG）を開発し、所沢・航空公園駅前（2015/11/13～2017/2/28）、KISTEC 光触媒ミュージアム（2016/7/1～現在も継続中）、姫路市役所（2016/11/1～2017/2/26）と3箇所において実証試験を行い、低照度環境下での連続使用に耐えうることが確認できている[4]。また、有機太陽電池ではないが、こちらも低照度環境に向いているとされているアモルファスシリコン太陽電池を使用したビーコンの実証試験が東大寺で行われた[5]。

有機太陽電池は、プラスチックフィルム基板に Roll-to-roll 技術によって製造することも可能で、セルサイズを自由に調整することができる[6]。従って、数 cm 角からメガソーラータイプのパネルまでのサイズに適用可能であり、多方面から期待されている。

しかしながら、現在適用されている太陽電池発電効率の性能評価方法は、IEC 60904 で標準化されている STC (1kWm^{-2} , 25°C) 下での Si PV 発電性能評価方法のみであり、低照度環境下での性能評価法は規定されていない。

また、近年は有機系太陽電池の一つであるペロブスカイト太陽電池にも注目が集まっている。ペロブスカイト太陽電池は 2009 年に宮坂ら（桐蔭横浜大学）により世界で初めて開発されたが[7]、当初 3.8%だった変換効率はその後の研究で 20%を超えるところまで進んでいる[8]。その出力の高さと溶液塗布により大面積化と低コスト化とを両立できる可能性から次世代の太陽電池として期待されているが、その発電挙動は時として色素増感太陽電池以上にヒステリシスが大きいという、光照射に伴い出力が低下していく傾向を示すものが多いため従来の性能評価法を適用できない。

色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、ペロブスカイト太陽電池など比較的新しく太陽電池と従来から使用されている結晶シリコン太陽電池も含めて太陽電池全体の普及をさらに進めるためにも、各太陽電池の特性に合い、照度や温度など使用環境に適した性能評価方法を確立する必要がある。

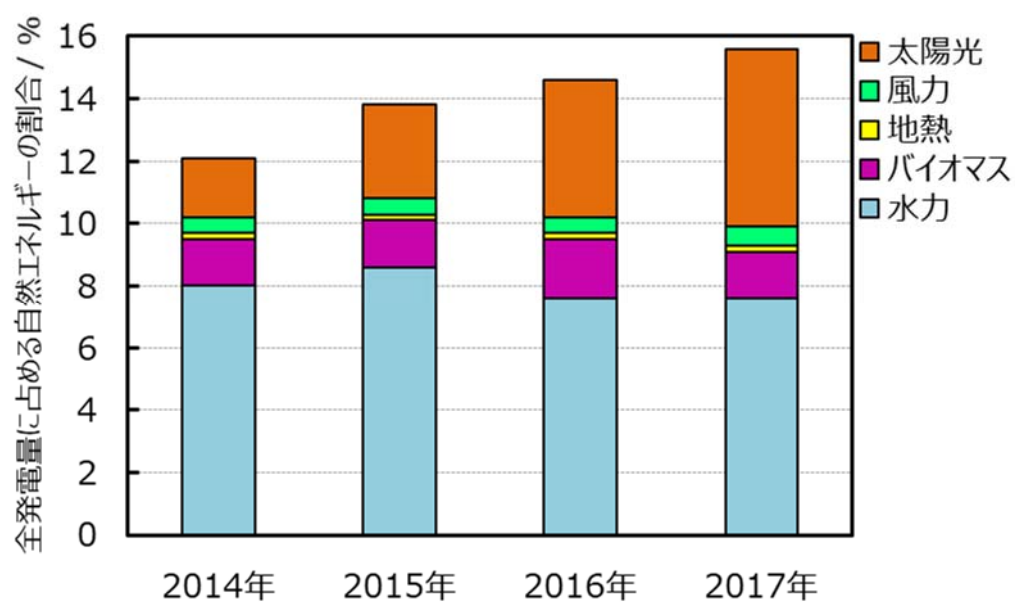


図 1-1-1 日本の全発電量に占める自然エネルギーの割合（2014 年～2017 年）

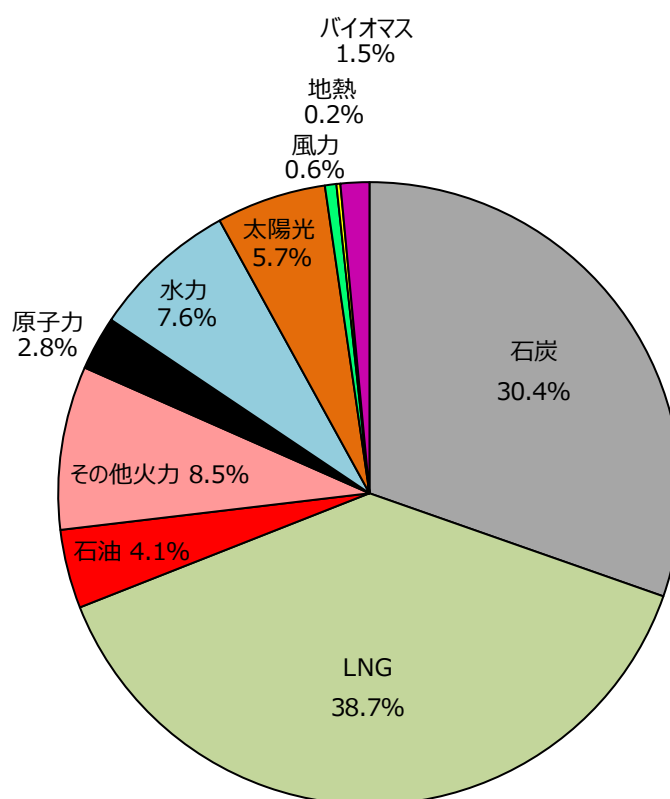


図 1-1-2 日本全体の電源構成（2017 年）

1-2 研究の目的

本研究では、主として太陽電池の室内利用を想定した場合の性能評価法について検討を行った。太陽電池の室内利用については（一社）電子情報技術産業協会（JEITA）でも検討され、JEITA 規格[9]として制定されているが、交流周波数による照度の揺らぎやパルス波形で制御される LED 照明器具の点滅現象までは言及されていない。

今後は IoT 機器の普及に伴い室内や日照条件の悪い屋外など低照度環境下での太陽電池利用が増加すると考えられるが、照明器具の特性や照度など、使用環境に即した性能評価法を確立することは急務である。そのためにも入力側である光の状態と、受光する太陽電池の特性を正確に把握する必要がある。

筆者の所属する神奈川県立産業技術総合研究所（KISTEC, 2016 年度までは神奈川県科学技術アカデミー：KAST）は、2011 年にスタートした FIRST-PG に参画して以来、有機太陽電池の評価方法を研究してきた[10]。この FIRST-PG において実験を重ねた結果、色素増感太陽電池のように応答の遅い太陽電池に対しては、JIS や IEC で定められている従来の評価法では対応しきれないということが明らかになった。それ以外にも、これまでの研究から特に実験室で作製されるような小面積セルにおいては、被測定セルの位置決め、低反射遮光マスクによる発電面積の規定、セル周辺からの反射光を排除することなどにより、測定の再現性が大幅に向上し、安定した結果を得られることが明らかとなっている[11]。

本論文では、はじめに太陽電池の特性を把握するのに重要な評価法のひとつである分光感度測定の最適化を目的とした検討を行った。

次いで、太陽電池の屋内使用に関して検討を行った。近年 IoT 機器という分野で取り扱われている小型通信機器の電源に太陽電池を利用するための研究が進んでいる。室内で使用する照明器具は 50 または 60Hz の商用交流電源で駆動され、その電源周波数に起因する「照度の揺らぎ」が発生する。この揺らぎは人の目には検知できないレベルだが、太陽電池の発電挙動には影響を与えており、発生する電流値は細かく増減を繰り返している。前述した IEC 60904 で標準化されている STC 下ではソーラーシミュレータ（SS）を使用するが、SS は太陽光を模しているため安定した直流電源を有している。このため、そこから得られる照射光はほぼ一定である。室内の照明器具下での使用を想定している太陽電池に対しては、この「照度の揺らぎ」を考慮した測定を行う必要がある。そのため、室内照明器具の照度測定における問題点の洗い出しおよび測定条件の最適化から検討を始め、複数のソースメーターによる検証を基に、直流安定化電源により駆動する低照度室内光シミュレータを開発した。この低照度室内光シミュレータは長時間の連続照射でも照度変動が少なく、太陽電池セルの

基本特性を適切に評価することが可能となった。

さらには、交流駆動で揺らいでいる光と直流駆動で安定した光の照射エネルギーを揃えることで使用環境に即した性能評価法を確立することを目的としている。

最後に、光電変換効率の高さから次世代の太陽電池として注目されているペロブスカイト太陽電池に関して、研究機関で作製される未封止のセルに対する取り扱い手順を検討し、基本的な発電性能だけでなく耐久性も視野に入れた性能評価方法を確立することを目的としている。

1-3 論文の構成

本論文は全 5 章で構成される。

第 1 章では序論として研究背景と目的に関して説明した。

第 2 章では有機太陽電池のひとつである色素増感太陽電池の分光感度測定法について検討した結果について報告する。色素増感太陽電池はシリコン系太陽電池に比べて応答が遅いため、測定条件の管理が重要になる。本研究では白色バイアス光強度やチョッピング周波数などの条件を変化させ、それぞれの影響について検討を行った。

第 3 章では商用交流電源で駆動する照明器具の照度測定など室内環境下における太陽電池性能評価に関する問題点と対処法について述べた。室内で使用される照明器具から照射される光は人の目には検知できない揺らぎを有している。また、LED 照明器具においては高周波の点滅を繰り返している機器も存在する。これら定常光でない環境における照度測定および発電性能評価における検討を行い、さらに、不安定な状況の光エネルギーと同等の放射照度を再現できる低照度室内光シミュレータの開発とその有効性について検証した。

第 4 章では近年注目されているペロブスカイト太陽電池の評価法および評価用機器の開発に関して検討した結果を述べる。ペロブスカイト太陽電池は未封止のまま測定に供される例が多いが、未封止のままでも長期間の連続測定を実現できる試験環境を整備した。

第 5 章は結論として本研究の成果と今後の課題について述べる。

第 2 章 色素増感太陽電池の分光感度測定法

2-1 はじめに

有機系太陽電池は、シリコン太陽電池（以下、Si PV と表記）に比べ製造時の CO_2 排出量が少なく、原材料の資源的制約も少ないというエネルギー・フレキシブル化・大面積化・高速印刷製造が可能という特徴を有している。特に、色素増感型太陽電池（以下、DSC と表記）は、製造工程に高額な真空装置やクリーンルームといった大がかりな設備が不要であるため製造工程コストを大幅に下げることが可能である。また、色素を調整することで色を変えることができるためデザイン性に富んだ用途も期待されている。図 2-1-1 に DSC の構造を示す。DSC は Si PV に代表される他の太陽電池のように P 型半導体と N 型半導体から構成されるのではなく、電解質を介した電気化学反応により発電する。それにより、発電効率の測定（I-V 測定）や分光感度測定において時間がかかるという特徴を有する。

太陽電池の特性を評価する手法として分光感度特性はとても重要であるが、DSC のように電圧変化に対する電流変化に時間がかかるものについては、その測定条件を精査し、最適な手順で測定しなければ正しい評価をすることができない。

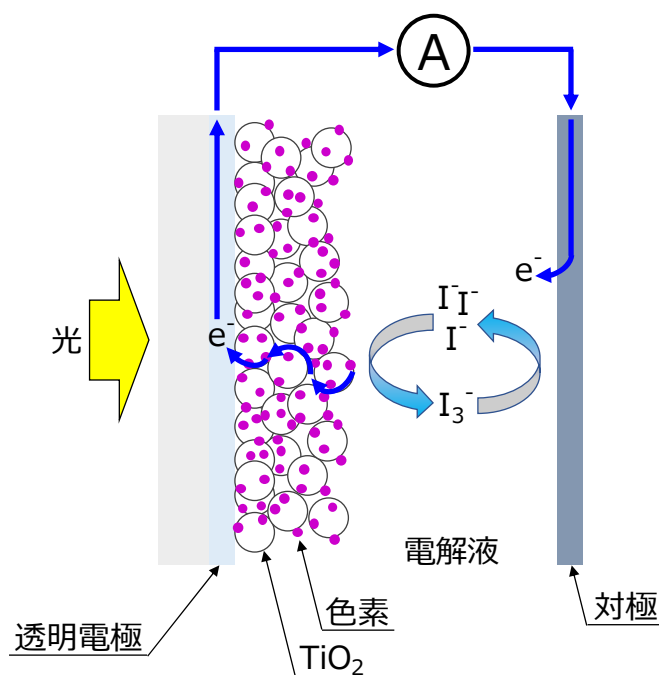


図 2-1-1 DSC の構造

DSC の分光感度に関してはこれまでも多くの研究グループから報告 [12]-[22]があるが、測定方法が異なるため、それらのデータを比較することは非常に困難である。

色素の種類によって吸収される光の波長範囲が変化し、この範囲を大きくするとセルの光起電力性能が向上するため、DSC では異なるグループによって得られたデータを比較するために分光感度測定法を標準化する必要がある。

2-2 使用した DSC セルおよび短絡電流密度の算出

DSC を研究している企業から提供された 2 種類のセルに対し分光感度測定を実施した。

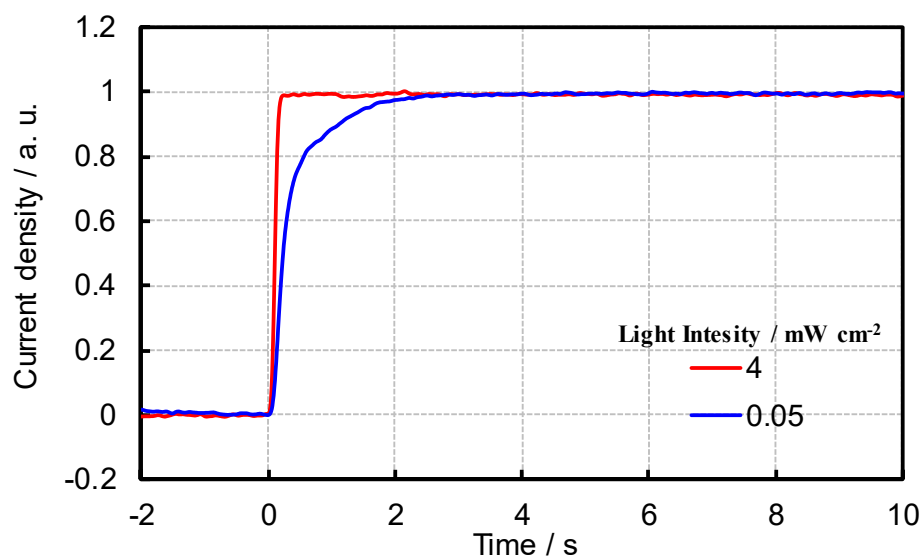
セル A は典型的な有機溶媒電解質である 3-Methoxypropionitrile (MPN) を使用したもの、セル B はイオン液体電解質を使用したものである。イオン性液体電解質の粘度は 20°C で MPN 電解質より約 30 倍高いものである。増感剤として Z907 を含浸させた多孔質 TiO_2 を共通に用いた。また、発電面積も 0.196cm^2 (受光部分は直径約 5mm の円形) と同一である。

各セルの短絡電流密度は測定された分光感度 ($SR(\lambda)$) と AM1.5G の標準放射照度 ($I(\lambda)$) の積分から (1) 式により算出した [23]。

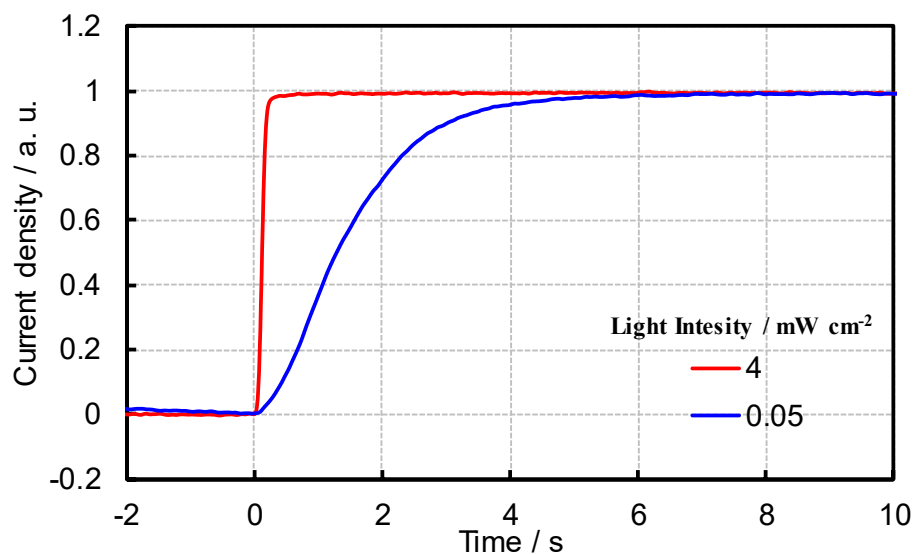
$$J_{sc_c} = \int I(\lambda) SR(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

2-3 単色光を連続照射させた際の電流応答とインピーダンス測定

単色光の光量を変化させた場合に短絡電流密度が定常状態になるまでの挙動を比較した結果を図 2-3-1, 2-3-2 および表 2-3-1 に示す。測定には分光計器社製 CEP-2000MLQRを用い、室温 25℃で 550nm および 750nm 両条件における最大出力 4mW cm^{-2} と最小出力 0.05mW cm^{-2} にて比較を行った。セルから発生した短絡電流は北斗電工社製無抵抗電流計 HM-104 を介してオシロスコープにより記録した。

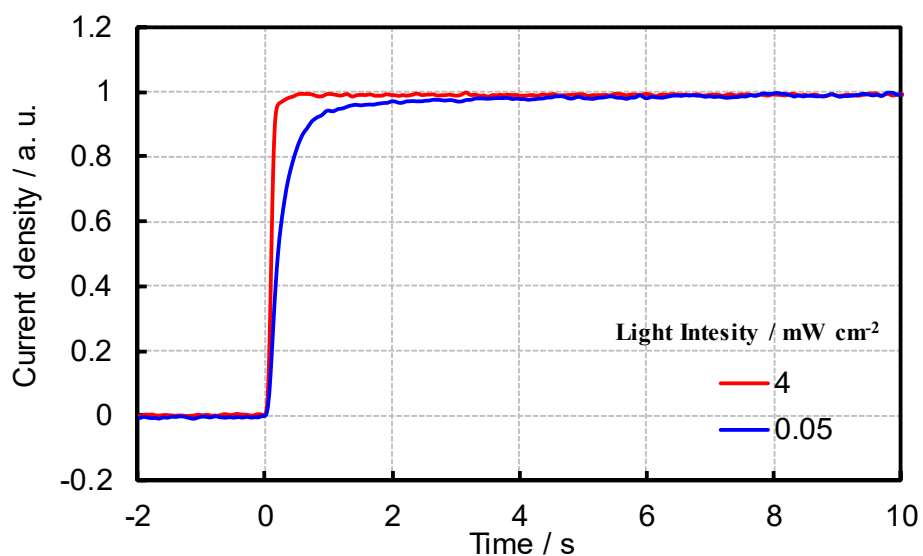


(a) 550nm の単色光を照射した場合

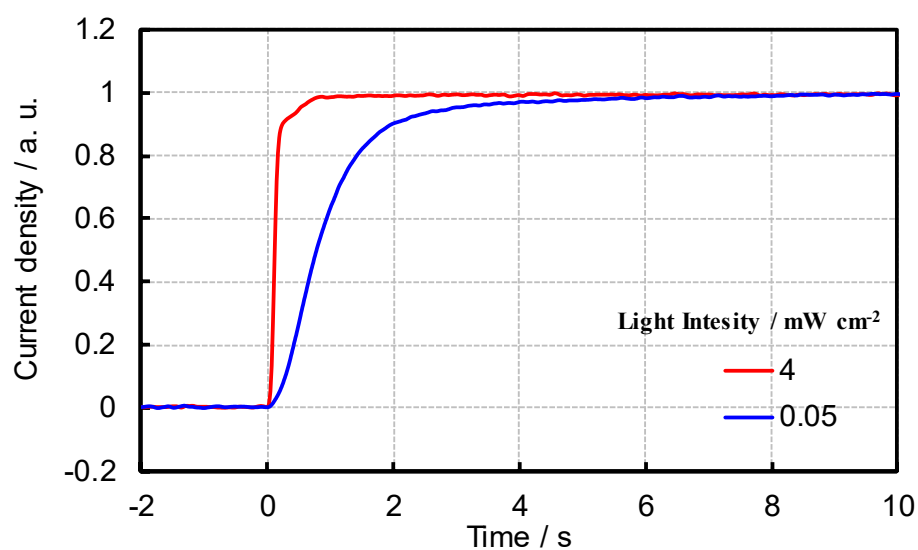


(b) 750nm の単色光を照射した場合

図2-3-1 セルAに対し単色光光量を変化させた際の短絡電流密度



(a) 550nm の単色光を照射した場合



(b) 750nm の単色光を照射した場合

図2-3-2 セルBに対し単色光光量を変化させた際の短絡電流密度

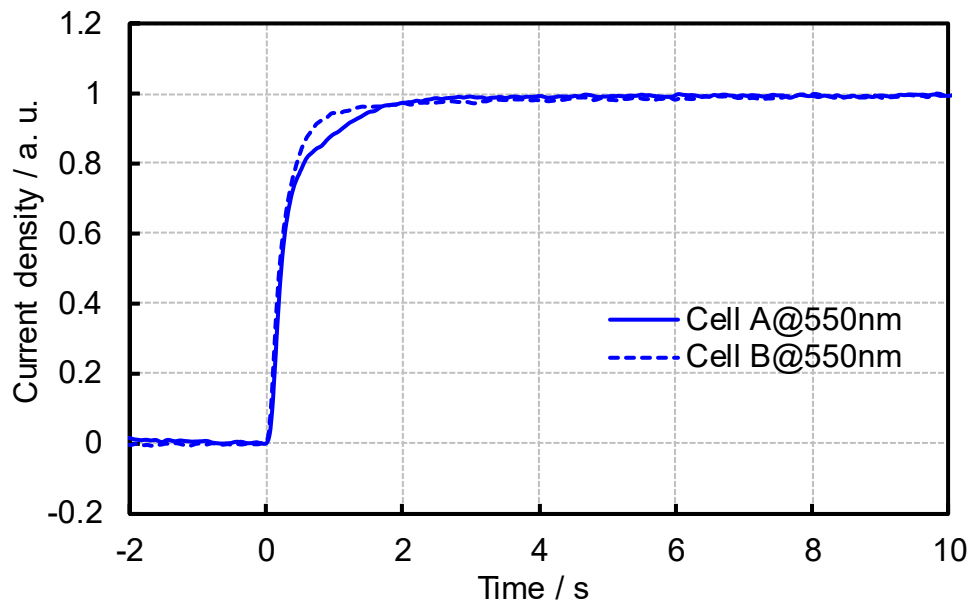
表2-3-1 短絡電流密度が定常値に達するまでの時間

単色光の波長	単色光強度	Cell A (通常溶媒)	Cell B (イオン液体)
550nm	4 mW cm ⁻²	0.23 s	0.41 s
	0.05 mW cm ⁻²	2.44 s	4.51 s
750nm	4 mW cm ⁻²	0.37 s	0.77 s
	0.05 mW cm ⁻²	5.55 s	5.61 s

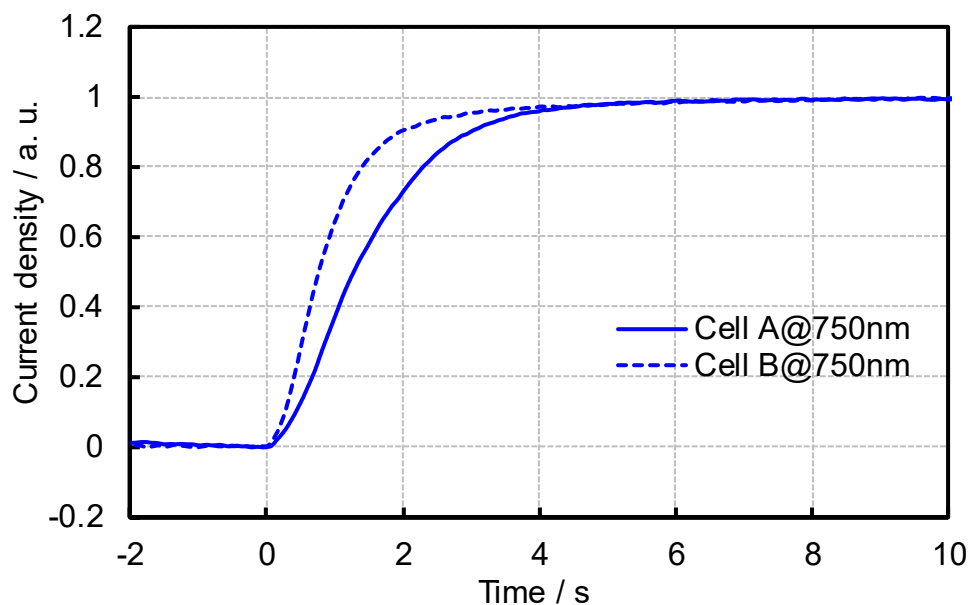
(最大値の99%に達するまでの時間)

実験から、セル A,B ともに光量が高い方が短時間で定常状態に達することが明らかとなった。この応答時間の照射強度依存性は、 TiO_2 層を横切る電子の拡散速度に関係しており、照射強度の増加に伴って増加する[13],[17],[21],[24]-[26]。

定常値に達するまでの時間はセル A よりもセル B の方が長い（応答が遅い）が、図 2-3-3 に示すとおり、照射強度が低い場合（ 0.05mW cm^{-2} ）における初期の電流立ち上がりに



(a) 550nm の単色光を照射した場合



(b) 750nm の単色光を照射した場合

図 2-3-3 照射光量 0.05mW cm^{-2} における電流密度の立ち上がり

についてはセル B の方が速いという結果になった。

さらに、DSC 内部での電子およびイオンの挙動を確認するために併せてインピーダンス測定（使用機器は Solartoron）を行った。

図 2-3-4 は 1sun 条件下での開放状態で得られたセル A および B の電気化学インピーダンススペクトルで、印加電圧は 10mV、周波数は 0.01Hz～100kHz の範囲で変化させた。

双方のセルともスペクトルは 3 つの半円から構成されている。32Hz, 20Hz の中間周波数部分は TiO_2 層の電子輸送と TiO_2 /電解質界面の反応と関連しているが、320kHz の高周波部分は対極の電荷移動に起因することが知られている。低周波部分は電解質中の I_3^- の拡散を反映する[27]。低周波域の半円は、セル A よりもセル B のほうが大きかった。この結果は、イオン液体中の I_3^- の拡散速度が溶媒電解質中の I_3^- の拡散速度よりも遅いことを示している。セル B はセル A に比べて応答が遅い（短絡電流密度が定常値に達するまでの時間が長い）のは、この現象によるものと考えられる。 TiO_2 層の電子寿命の逆数に比例する中間周波数領域の半円の上部の特性周波数は、セル A の場合よりもセル B のほうが高い。この結果から、セル B における電流の立ち上がりが速い理由はイオン液体を用いた場合の TiO_2 中の電子寿命が短いことに関連していると考えられる。Fabregat-Santiago ら[28]はまた、DSC のインピーダンス測定により、イオン液体電解質中よりも溶媒電解質中における TiO_2 中の電子寿命がはるかに長いことを示唆したが、 I_3^- の拡散速度については、溶媒電解質よりもイオン液体電解質の方が低い。

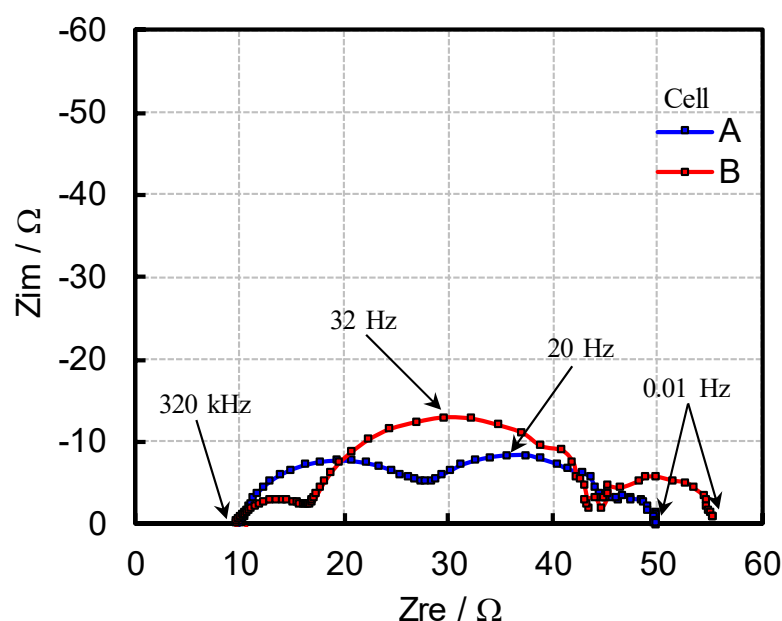
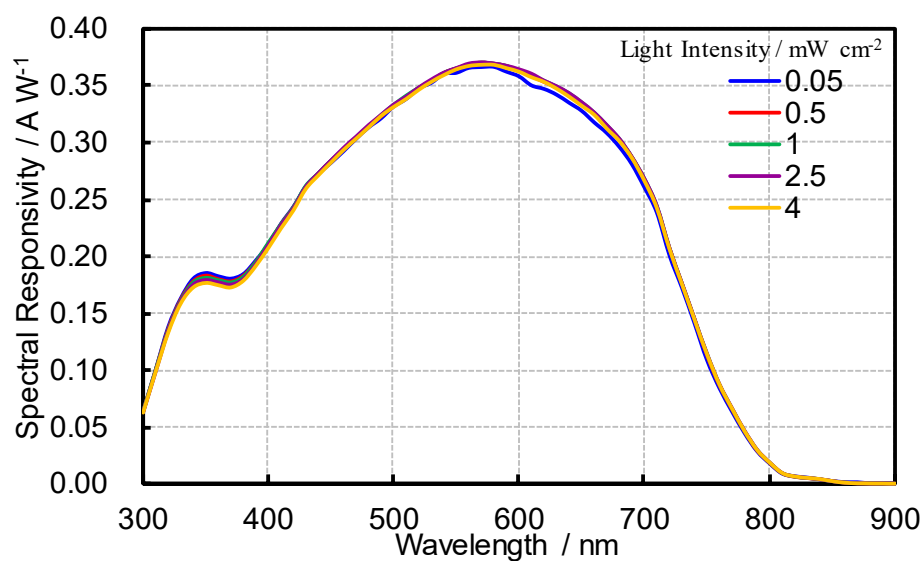


図 2-3-4 1sun 条件下における開回路条件で得られた電気化学インピーダンススペクトル

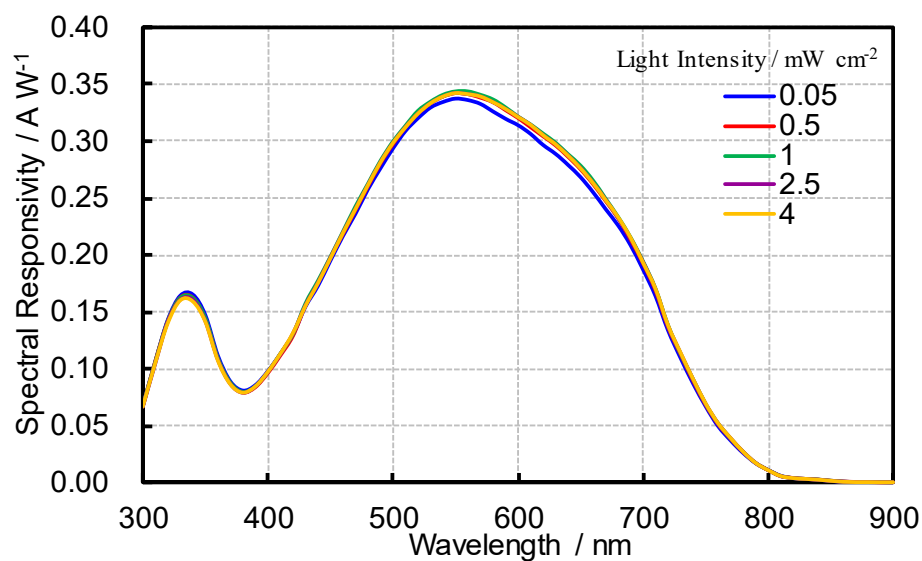
2-4 DC法による分光感度測定

白色バイアス光無しで単色光を連続的に照射するDC法によって得られた分光感度曲線を図2-4-1に示す。どちらのセルにおいても単色光強度が $0.05 \sim 4.0 \text{ mW cm}^{-2}$ の範囲では分光感度曲線はほとんど変化しなかった。

次に短絡電流密度と単色光強度の関係を図2-4-2に示す。どちらのセルも、広い範囲において短絡電流密度と単色光強度との間には線形関係が確認された。



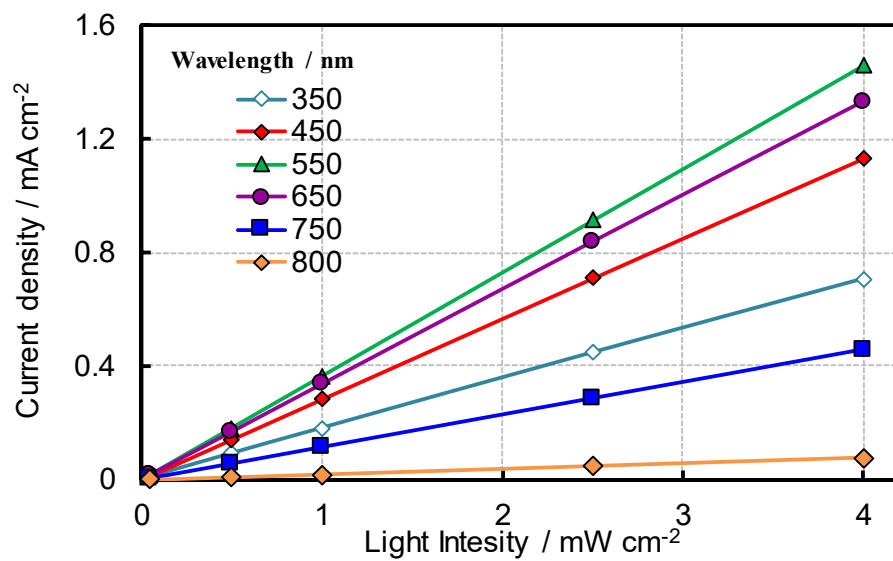
(a) セル A



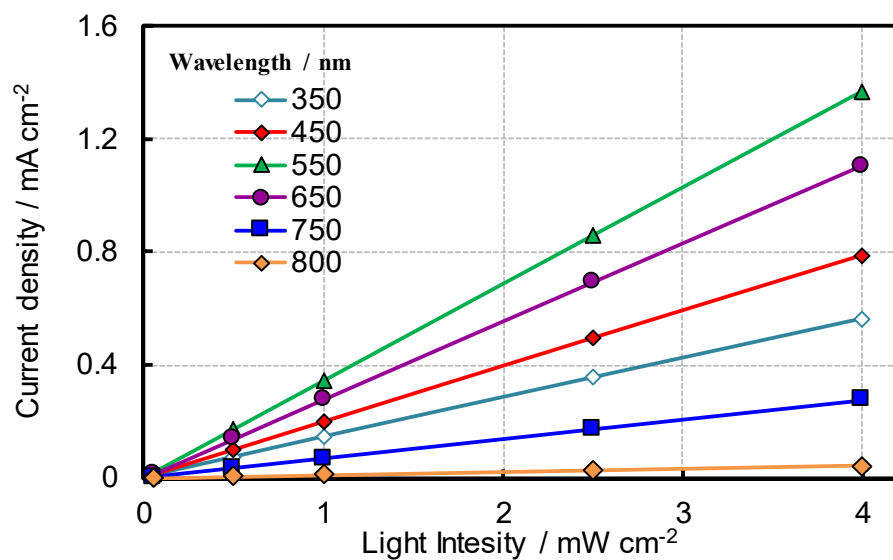
(b) セル B

図 2-4-1 DC 法による分光感度測定結果

Hohl-Ebinger ら[17]は、Sommeling らの報告[18]を基に、イオン液体セルの短絡電流と照射光強度の間に非線形の関係があることを示唆している。しかし、Sommeling らは、イオン液体電解質ではなく、ポリエチレングリコール（PEG）を含む粘性電解質で非線形の関係が観察されたと報告している。今回の実験結果は、イオン液体中の I_3^- の拡散速度が低い場合には、短絡電流と光強度との線形関係にはほとんど影響を与えないことを示唆している。



(a) セル A

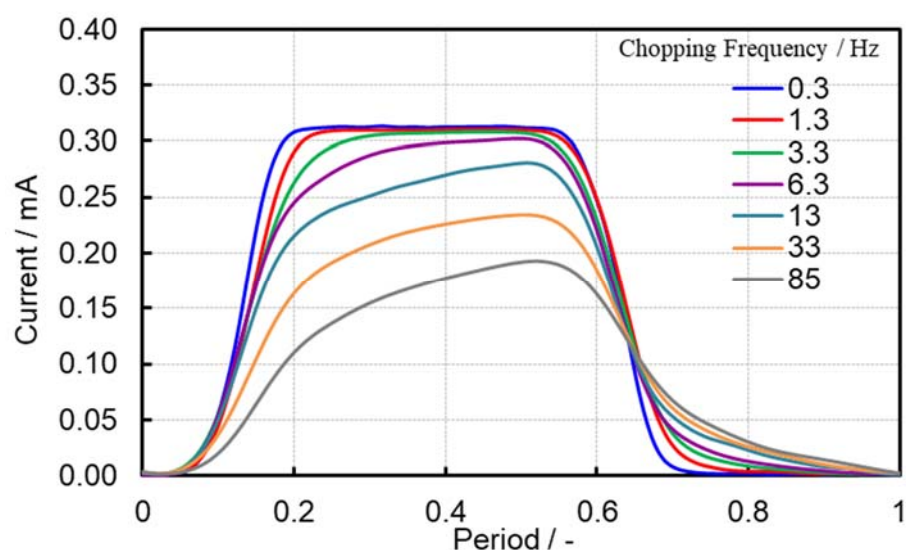


(b) セル B

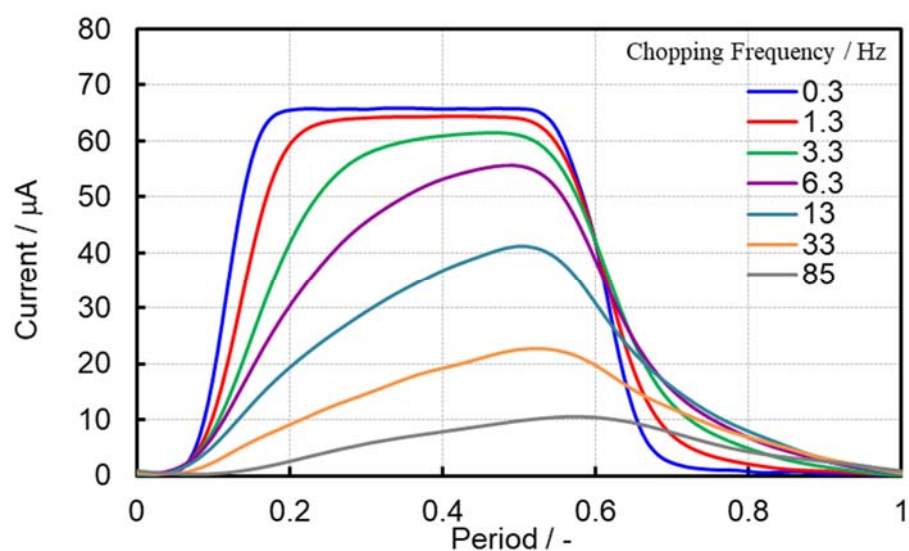
図 2-4-2 短絡電流密度と単色光強度の関係

2-5 パルス照射された単色光に対する電流応答

白色バイアス光が無く、パルス照射された照射強度 4mW cm^{-2} の単色光に対する短絡電流値の過渡応答を図2-5-1および図2-5-2に示す。なお、チョッピング周波数は $0.3\sim 85\text{Hz}$ の範囲で変化させた。



(a) 550nm の単色光を照射した場合



(b) 750nm の単色光を照射した場合

図2-5-1 単色光をパルス照射させた場合の過渡短絡電流値

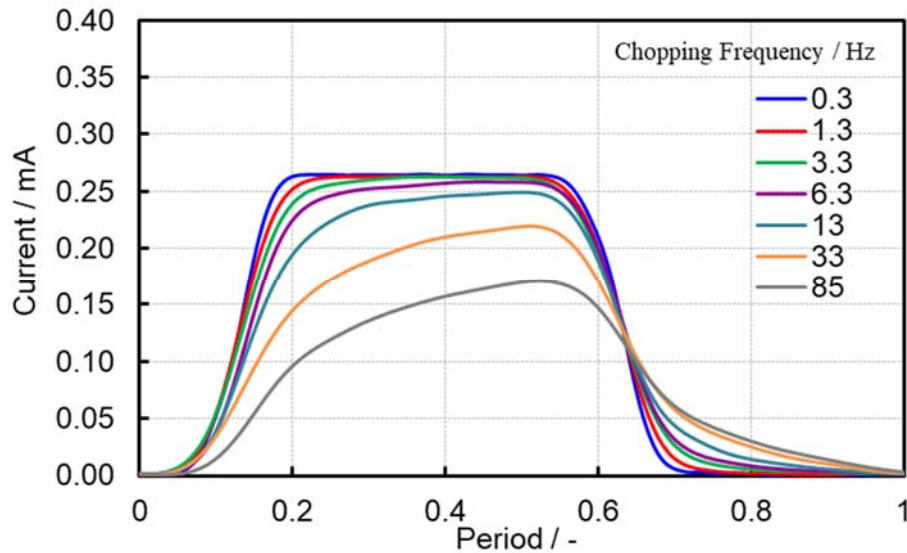
使用セル：A（有機溶媒）

白色バイアス光：無し

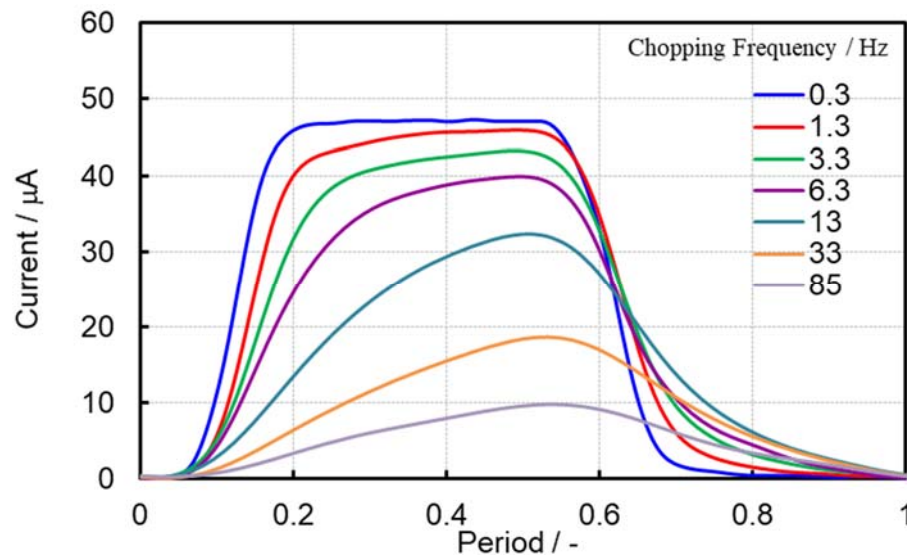
単色光強度： 4mW cm^{-2}

波長 550nm においては、両セルともチョッピング周波数が 1.3Hz より低い条件であれば短絡電流値が定常状態値に達することができた。

750nm の波長においては、定常状態値を得るためのチョッピング周波数は、いずれのセルにおいても 0.3Hz 以下となった。これらの結果は、750nm の波長における分光感度が低く、 TiO_2 層を横断する電子の拡散速度が低いために引き起こされるものと推測する。



(a) 550nm の単色光を照射した場合



(b) 750nm の単色光を照射した場合

図2-5-2 単色光をパルス照射させた場合の過渡短絡電流値

使用セル：B（イオン液体）

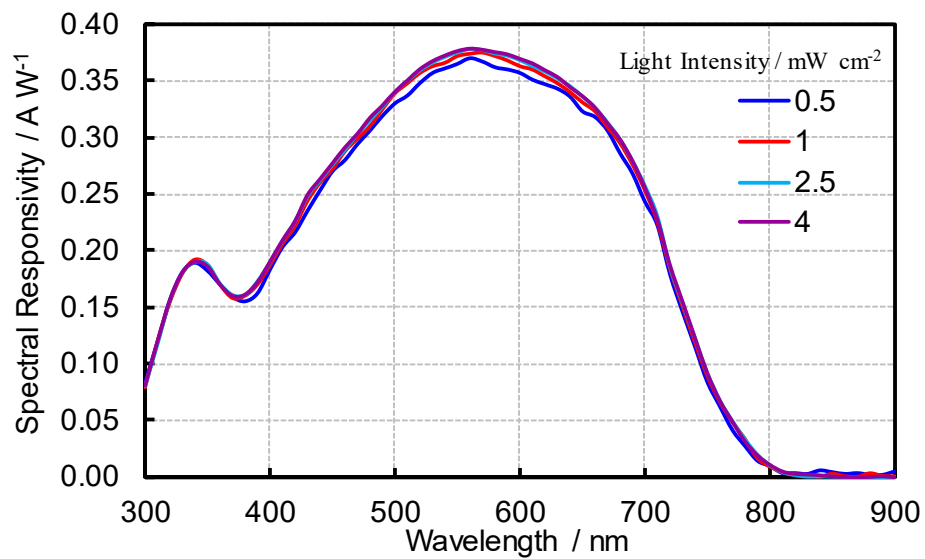
白色バイアス光：無し

単色光強度： 4mW cm^{-2}

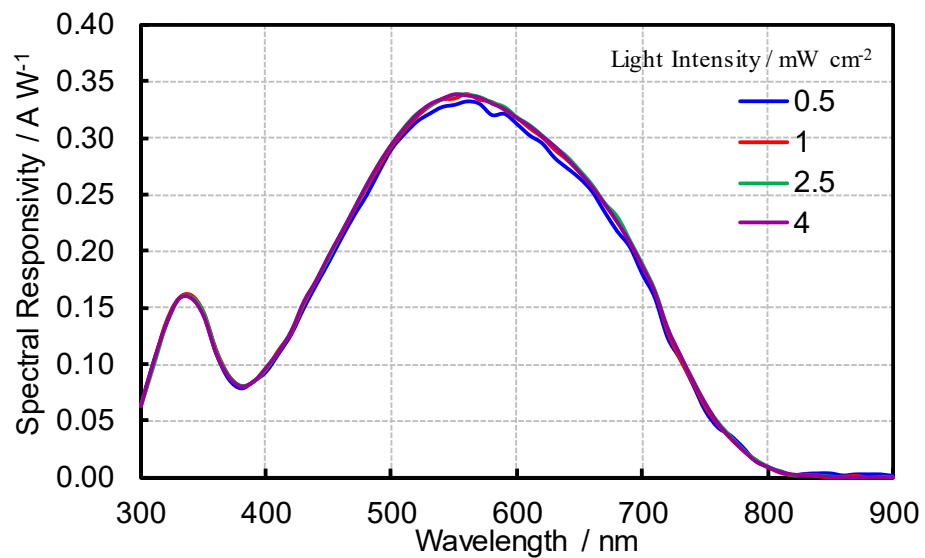
2-6 AC法による分光感度測定

AC法において分光感度に及ぼす単色光強度の影響を図2-6-1に示す。このときのチョッピング周波数は0.3Hz、単色光照射強度は $0.5 \sim 4.0 \text{ mW cm}^{-2}$ の範囲で変化させた。

両セルとも単色光強度は分光感度曲線に対してほとんど影響を与えていない。前述したDC法と同様に、短絡電流値と単色光強度との間に直線的な関係があることが明らかとなった。



(a) セル A



(b) セル B

図 2-6-1 AC 法において分光感度に及ぼす単色光強度の影響 (チョッピング周波数 0.3Hz)

2-7 チョッピング周波数の影響

白色バイアス光照射無しの状態で分光感度におよぼすチョッピング周波数の影響を図2-7-1に示す。このときの単色光強度 2.5mW cm^{-2} は300～900nmの範囲で得られる最大出力である。

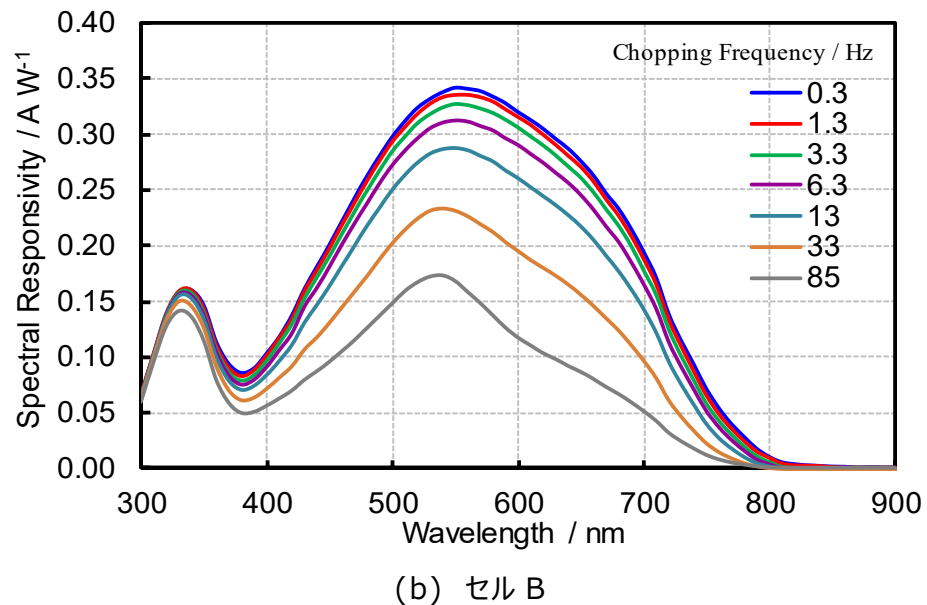
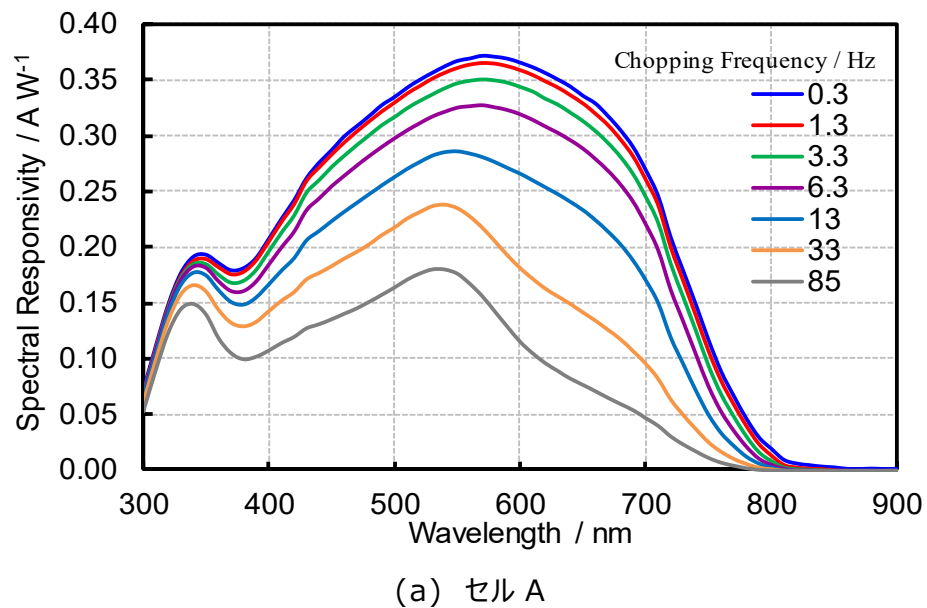


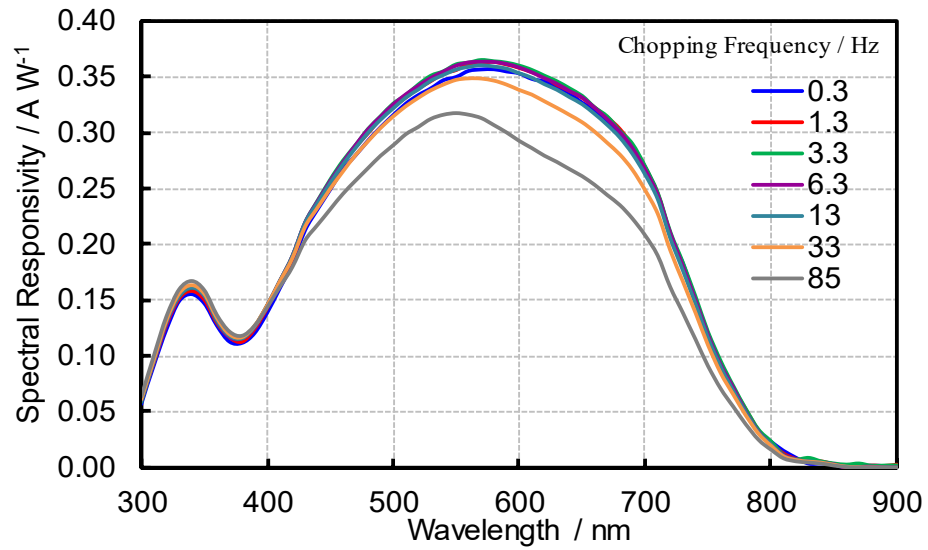
図 2-7-1 チョッピング周波数の影響

白色バイアス光：無し

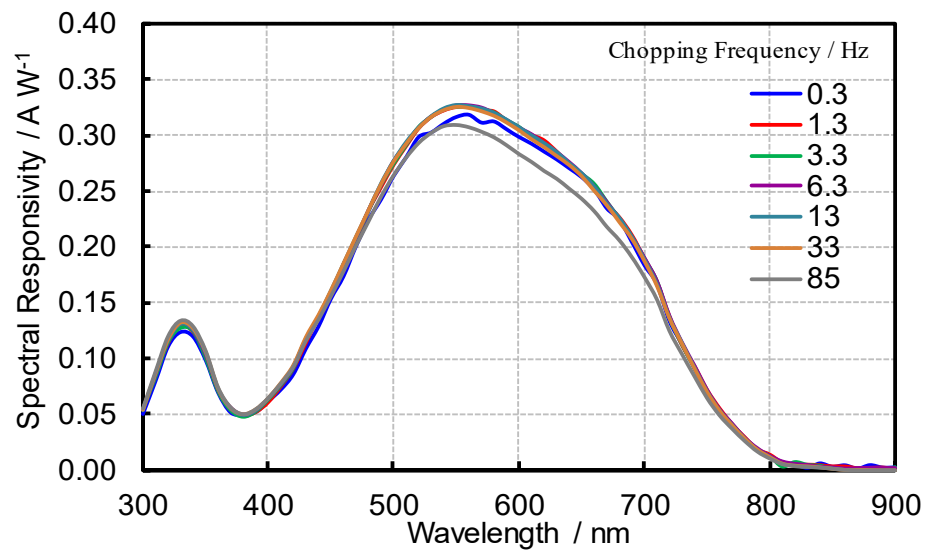
単色光強度： 2.5mW cm^{-2}

チョッピング周波数を0.3Hzに設定した場合の分光感度は、図2-4-1に示したDC法での測定結果とほぼ同じであったが、両セルとも1.3Hz以上の周波数になると周波数の増加に伴って分光感度は減少していく。この減少挙動は図2-5-1および図2-5-2に示すように電流値が1.3Hzより高いチョッピング周波数では定常値に達しなかったため、短絡電流の応答が遅いことによって説明できる。

白色バイアス光強度を1sunに設定したAC法におけるチョッピング周波数の影響を図2-7-2に示す。セルAは、バイアス光照射無しで測定した場合と同様に、チョッピング周波数が13Hzより高くなるにつれて分光感度が減少し、3.3Hzから13Hzまでの範囲においてはほぼ一定であった。しかし、チョッピング周波数が1.3Hzより低い場合にも分光感度は低下する。これはバイアス光照射なしで測定した場合とは異なる挙動である。セルBについても0.3Hzのチョッピング周波数では分光感度が低下する挙動を確認できた。この低下挙動の原因については後述する。



(a) セル A



(b) セル B

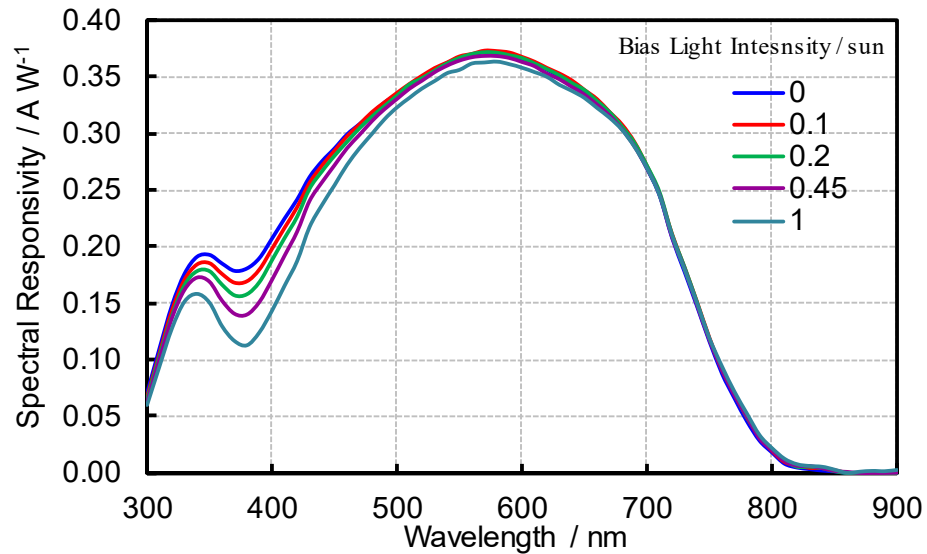
図 2-7-2 AC 法におけるチョッピング周波数の影響

白色バイアス光 : 1sun

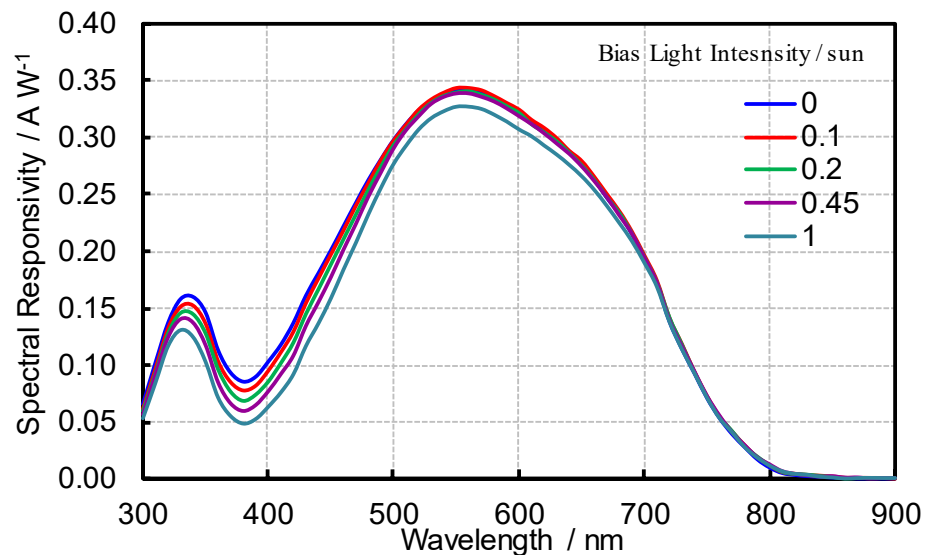
単色光強度 : 2.5 mW cm^{-2}

2-8 白色バイアス光強度の影響

AC法において白色バイアス光強度が分光感度に与える影響について図2-8-1に示す。この測定におけるチョッピング周波数は各白色バイアス強度において最も高い値を示す条件を採用した。詳細を表2-8-1に示す。



(a) セル A



(b) セル B

図 2-8-1 AC 法における白色バイアス光強度の影響

白色バイアス光 : 0~1sun

単色光強度 : 2.5mW cm^{-2}

図に示すように、両セルとも白色バイアス光強度が増加するにつれて分光感度が低下しており、これは、原らの結果[12]、Guoらの結果[21]、荒川の結果[22]と同じである。

これは、高強度の白色光を重畳した場合、多くの色素が励起されて TiO_2 の電子移動が発生し、電極表面近傍にはより多くの I_3^- が生成され、光吸収が増加するために500nm以下の波長領域において分光感度が低下すると示唆している。これが正しければ、上述のチョッピング周波数を減少させて分光感度が減少することも、長時間照射によって生じる I_3^- の蓄積に関連している可能性がある。

表 2-8-1 白色バイアス光強度の影響を確認した際の測定条件

Bias Light Intensity / sun	0	0.1	0.2	0.45	1
Cell A Chopping Frequency / Hz	0.3	0.3	0.3	3.3	1.3
Cell B Chopping Frequency / Hz	0.3	0.3	0.3	1.3	6.3

2-9 まとめ

式（1）から算出されるセルAおよびBの短絡電流密度について、ソーラーシミュレータによる1sun照射条件での短絡電流密度と比較した結果を表2-9-1に示す。

表中 J_{SCm} はソーラーシミュレータによる1sun照射で得られた短絡電流密度、 J_{SCc} は分光感度測定で得られた結果から式（1）により算出された短絡電流密度である。

1sunの白色バイアス光を照射した条件でのAC法で測定した分光感度測定から得られた短絡電流密度 $J_{SCc}(AC\ method)$ はソーラーシミュレータの照射によって得られた短絡電流密度 J_{SCm} と一致したが、バイアス光無しのDC法によって得られた $J_{SCc}(DC\ method)$ より高い値を示した。

本来、DSCの分光感度は各波長における電流値が定常状態になるよう適切に設定されたチョッピング周波数であれば、ASTM E1021[29]による従来のAC法を用いて測定することができる。しかし、DSCの分光感度はシリコン太陽電池とは異なり、バイアス光強度で変化するので注意が必要である。本研究の結果は、実際の使用の場合と同様の照明条件で分光感度測定を行うべきであることを示唆している。

表 2-9-1 各手法による短絡電流密度の比較

Cell	J_{SCm} SS	J_{SCc} AC method	J_{SCc} DC method
A	16.83	16.66	17.50
B	12.33	12.28	13.37

mA cm⁻²

第 3 章 室内低照度環境下における太陽電池評価

3-1 はじめに

KISTEC では 2014 年度から受託分析として太陽電池評価を実施しているが、これまでに持ち込まれた有機太陽電池は STC よりも低い照度での評価を求められているものばかりである。多くの技術相談を受けて判ったのは、企業内で低照度環境を再現しようとした場合には光源として蛍光灯デスクライトなど交流電源で駆動される市販の照明器具を使用しているということである。

しかし、商用交流電源の電圧は 50/60Hz の正弦波であるため、それにより駆動される照明器具が発する光は 100/120Hz の周波数で揺らいている（白熱球や蛍光灯の場合は電圧がマイナス側に振れても点灯するので 2 倍の周波数で揺らぐこととなる）。

この「揺らぎ」は人間の目では感知できないが太陽電池の発電に影響をおよぼし、「揺らいだ発電挙動」を示すこととなる。

このような問題は近年普及が拡大している LED 照明においても同様の現象を確認することができる。元々 LED は直流で点灯するものであり、LED 電球や照明器具内に AC-DC 変換器を装備しているのだが、交流を全波整流した状態の直流であるため、マイナス側に振れないというだけの「振動している直流」により点灯しているものが殆どである。

さらに、各器具とも温度変化によると思われる照度の変動が激しく、太陽電池の発電性能評価として考えた場合、入力エネルギーを規定するのに大きな問題がある。

一方、太陽光を模したソーラーシミュレータはこのような照度変動を排除するため、強力な安定化電源を装備しており、発電挙動は安定したものとなる。

本論文では、室内低照度環境下で太陽電池性能評価を行う場合の注意点について述べ、再現性の高い評価法に関して検討するとともに、LED 光源を使用した性能評価システムの試作品を開発した。

これらを基に室内低照度環境下における性能評価法を提案することを目的とする。

3-2 商用交流電源を使用した市販照明器具の照度測定

「商用交流電源で駆動される照明器具が発する光の揺らぎ」を測定する実験装置を図 3-2-1 に示す。装置は照明器具の光を受けた単結晶シリコン太陽電池（c-Si PV）が発生した電流を無抵抗電流計を介してオシロスコープで記録するという構成になっている。

ここで使用した光源は ALPHAX 社製 AL-50FL 型である。図 3-2-2 に器具の外観を示す。この照明器具は背面に設置された AD コンバータにより交流電源から直流に変換して LED を点灯させている。図 3-2-3 にこの LED 照明下で c-Si PV から発生した電流の挙動を示す。図に示すように、c-Si セルの電流は、50Hz の 2 倍である 100Hz で揺らいでいることが明らかとなった。

次に、このような「揺らいでいる光」の照度を正確に測定するための手順について検討した結果を述べる。太陽電池評価においては入力エネルギーを正確に規定しなければならないので、通常の照度計（ルクスメーター）ではなく分光放射照度計を使用する必要がある。今回の実験では相馬光学製 S-2440 型分光放射照度計を使用した。

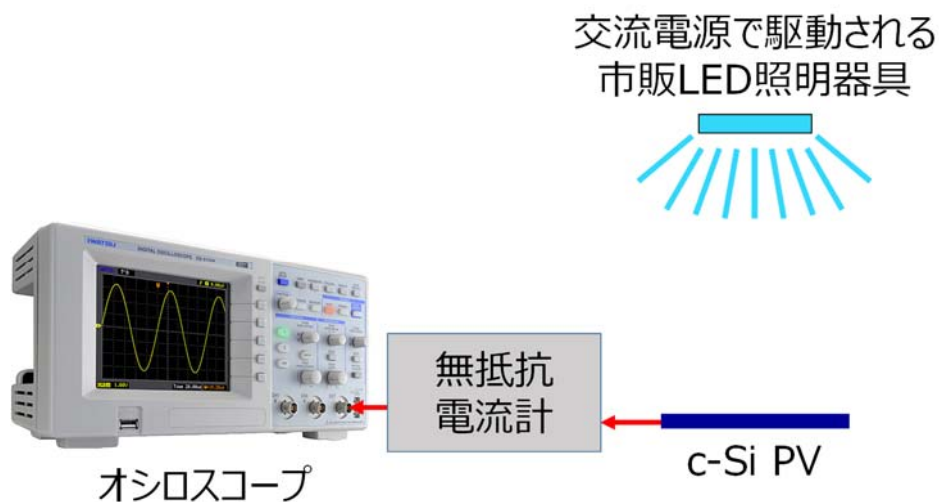
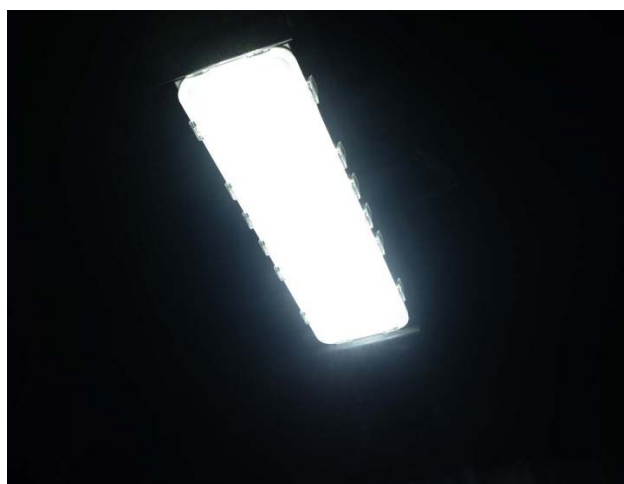
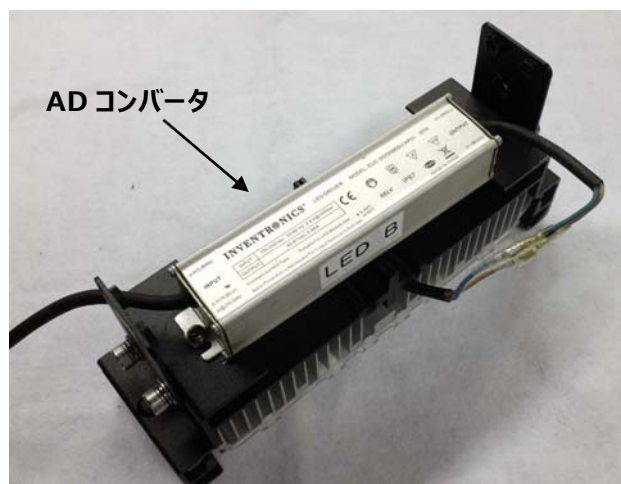


図 3-2-1 交流電源で駆動する照明機器が発生する光の揺らぎを測定するための実験装置

このとき気を付けなければならないのは測定条件を自動モードにしてしまうと、露光時間が揺らぎの周期と一致せず、結果が測定ごとに変化してしまうことである。実際にこの実験においては 12.8ms という数値が最適露光時間として選択された。露光時間を 12.8ms に設定した場合と手動モードで 10ms に設定した場合の測定結果を図 3-2-4 および表 3-2-1 に示す。



(a) 照射面



(b) 背面に設置された電源

図 3-2-2 ALPHAX 社製 AL-50FL 型 LED 光源の外観

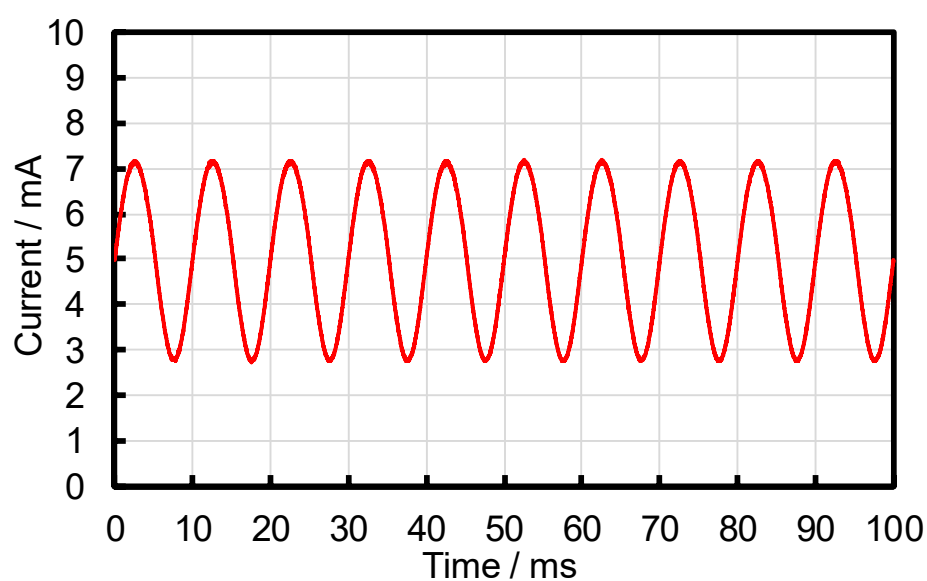
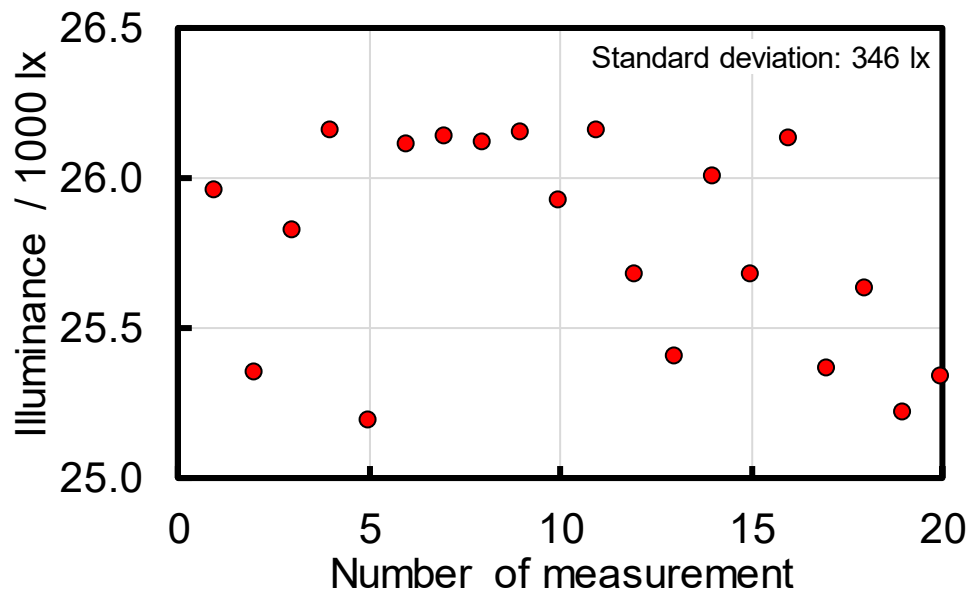


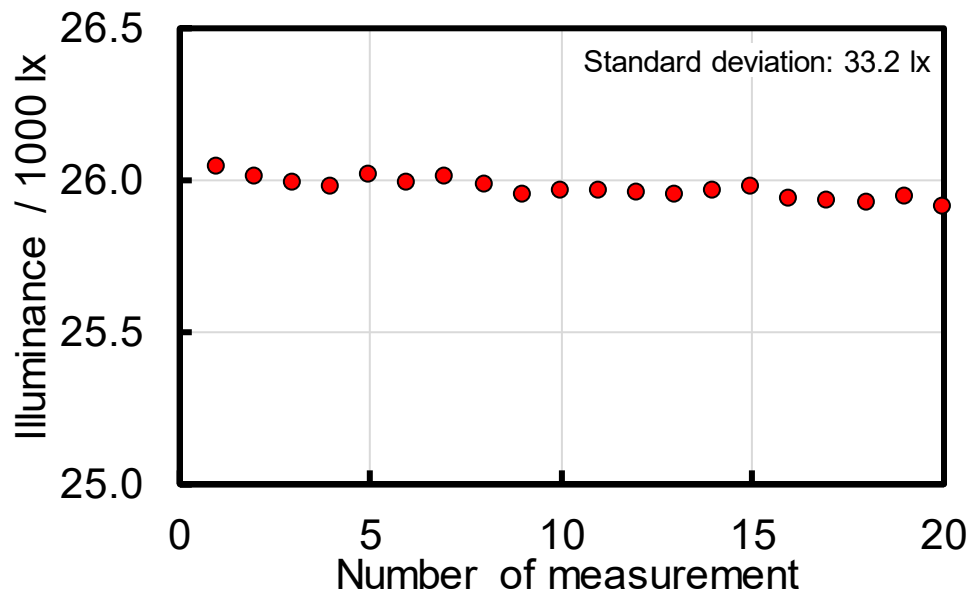
図 3-2-3 c-Si PV から発生された電流の挙動



(a) 露光時間と揺らぎの周期が一致しない場合

露光時間 : 12.8ms (自動)

露光時間が 10ms の整数倍でないために数値が安定しない



(b) 露光時間と揺らぎの周期が一致した場合

露光時間 : 10.0ms (手動)

露光時間が周期と一致しているため数値が安定している

図 3-2-4 露光時間が異なる場合の照度測定結果

交流電源で点灯している照明器具の照度を測定する場合、露光時間と周波数にズレがあると単位時間内に積算される光量が測定ごとに変わってしまうため正しい測定を行うことができない。事前に測定条件を確認し、複数回の測定を行い、再現性を確認する必要がある。

図 3-2-3 に示す通り、東日本の電源周波数は 50Hz であるため、光は 100Hz の周期で揺らいでいる。このとき、測定機の露光時間を 10ms の整数倍に設定しなければ、測定ごとに値が違ってしまふ。図 3-2-4(a)は自動モードの設定で、最適露光時間が 12.8ms となっているため、得られた照度は誤差が大きい結果となった。一方、(b)は露光時間を手動で 10.0ms に設定した場合の結果で、こちらはほぼ一定の値を得ることができた。光量は全く同じであるにもかかわらず、測定条件によって値が大きく異なってしまう。測定機器の多くは自動モードと手動モードを切換えられるようになっているので、必ず手動モードを選択する。

表 3-2-1 露光時間が異なる場合の照度測定結果（詳細）

測定モード	Automatic mode		Manual mode	
露光時間	12.8ms		10.0ms	
測定回数	Illuminance	Irradiance	Illuminance	Irradiance
	lx	mW cm ⁻²	lx	mW cm ⁻²
1	25951	7.92	26042	7.93
2	25350	7.73	26004	7.91
3	25822	7.89	25984	7.89
4	26152	7.99	25972	7.89
5	25185	7.69	26015	7.93
6	26104	7.97	25984	7.90
7	26132	7.99	26009	7.93
8	26111	7.96	25982	7.91
9	26150	7.98	25945	7.88
10	25923	7.92	25963	7.90
11	26157	7.99	25963	7.90
12	25671	7.82	25953	7.90
13	25404	7.74	25949	7.89
14	26000	7.94	25960	7.91
15	25671	7.84	25975	7.93
16	26125	7.97	25936	7.90
17	25361	7.73	25928	7.90
18	25629	7.82	25921	7.88
19	25214	7.71	25938	7.90
20	25332	7.72	25907	7.88
最大値	26157	7.99	26042	7.93
最小値	25185	7.69	25907	7.88
平均値	25772	7.87	25967	7.90
標準偏差	346	0.11	33.2	0.02

交流電源による人工光源の照度測定を行う際には必ず手動モードを選択し、露光時間が周期の倍数になるように設定しなければならない。また、光が揺らいだ状態であることも一回の測定では見過ごしてしまうことがある。再現性の確認のためにも、測定は必ず複数回行うことが重要である。

台湾の Chen らは室内環境における色素増感太陽電池の発電性能評価に関するラウンドロビンテストを実施しているが、各機関で測定した結果の差が非常に大きい[30]。光量測定や使用した機器に関して詳細な記述が無いため推察するに過ぎないが、光量測定から全て手順を明白にすることでラウンドロビンテストの精度が向上すると考えられる。

手動で設定する露光時間であるが、これも適度な長さでなければ測定値に影響を与え、露光時間が短過ぎても長過ぎても測定は不安定になる。特に長すぎる場合にはダイナミックレンジをオーバーしてしまうため図 3-2-5 に示すようにスペクトルの形状が大きく崩れていく。複数回の予備実験を繰り返してから最適な測定条件を決めることが重要である。

さらに、測定の積算回数も数値の変動に影響を与える。図 3-2-6 は露光時間を 10ms に固定して積算回数を変化させた結果である。(a)は積算回数による測定結果の変動を示したもの、(b)は積算回数と変動率の関係を示したものだが、積算回数が多いほど結果が安定することが明らかとなった。

今回の実験では最大 10000 回まで積算したが、実用的には 500 回程度の積算（測定時間は約 5 秒）で問題は回避できると考えられる。なお、照度の変動率は JIS C 8912 により定められている放射照度の時間変動率を求める計算式により算出した。式(1)に示す。

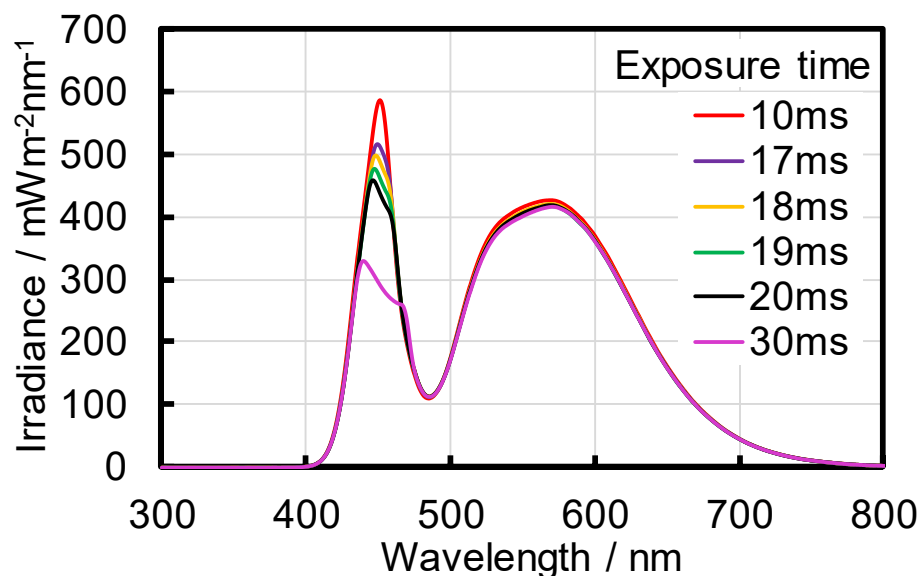
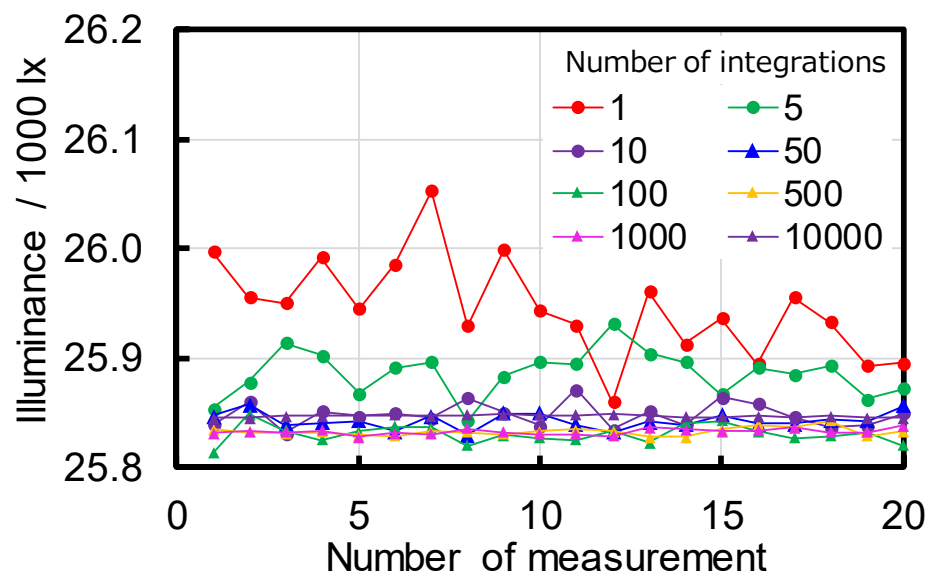
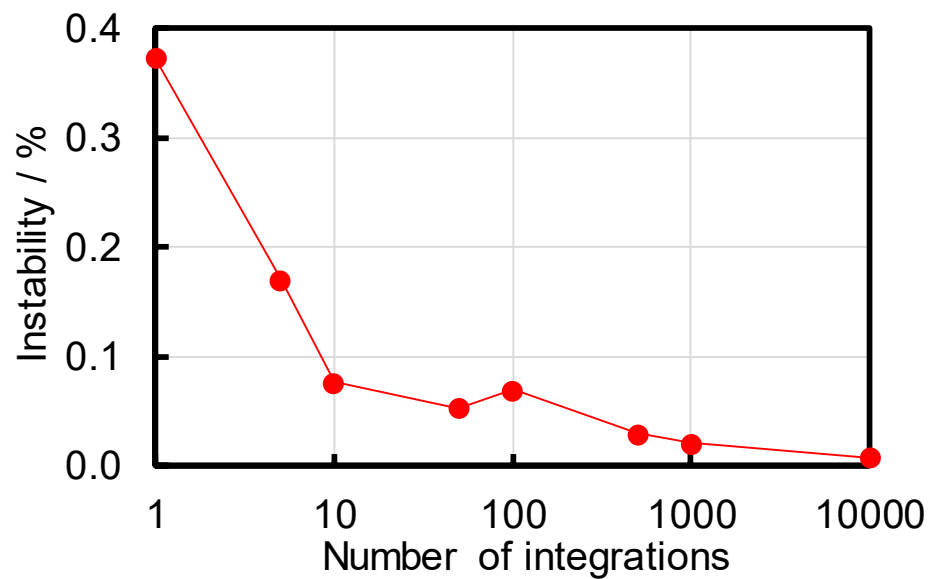


図 3-2-5 露光時間を長くした場合のスペクトル変化

$$\text{変動率 } \Delta E = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100 \quad \cdots (1)$$



(a) 積算回数による照度測定結果の変動（20 回測定）



(b) 積算回数と変動率の関係

図 3-2-6 積算回数と照度測定結果の関係

3-3 交流電源で駆動する照明下における I-V 測定

照度測定と同様に、測定取り込み時間の設定は I-V 測定においても重要である。図 3-3-1 は ADC 社製 6246 型ソースメーターと山下電装社製ソフトウェアの組み合わせで前述した ALPHAX 社製 AL-50FL 型を光源にして多結晶 Si 太陽電池 (p-Si PV) の I-V 測定を行った結果である。山下電装社の測定ソフトウェアは遅延時間や積分時間などを全て手動で設定できるため、本研究のように評価法を開発するための使用に適している。図中 (a) は積分時間が 1ms と測定が早すぎるため交流周波数を反映している。(b) は積分時間を 5ms と増加させたが、まだ交流周波数の影響を取り除けていない。(c) は積分時間を周期と同じ 10ms に設定したため交流周波数の影響を取り除けている。(d) は 3 回の測定結果を重ねたもので、積分時間を延長することにより振動の中央値に向かって収束している様子が確認できた。

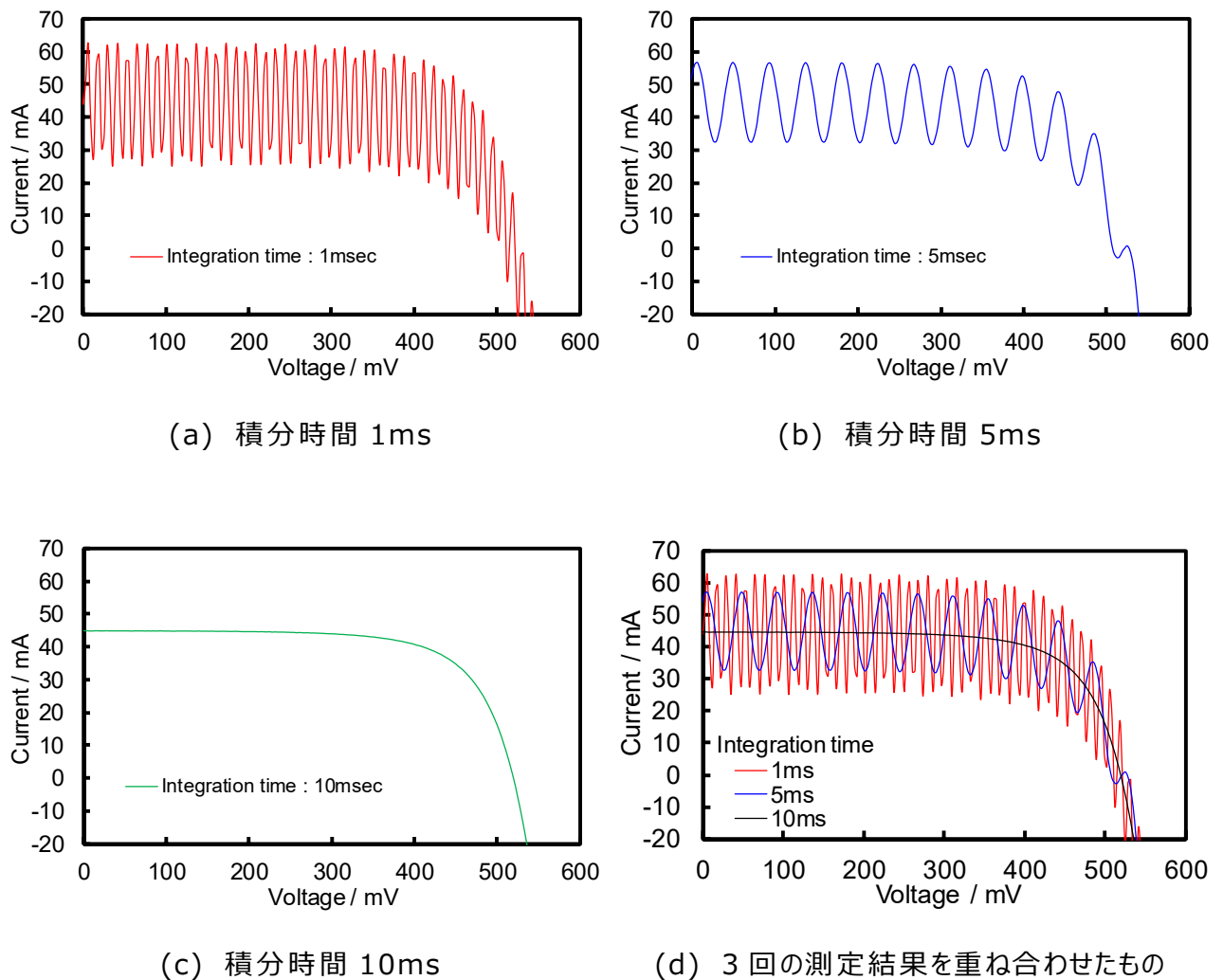
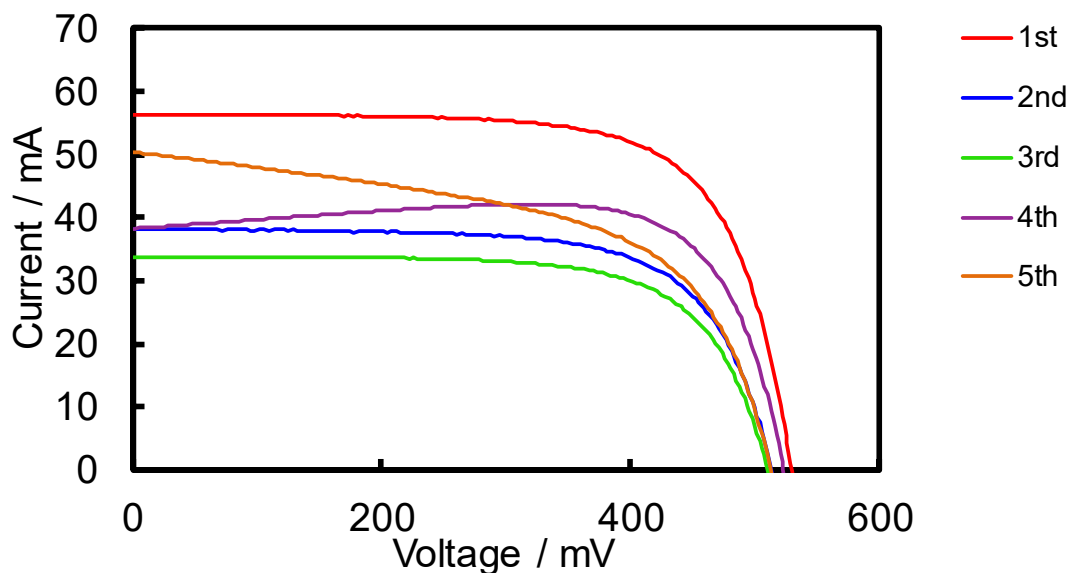


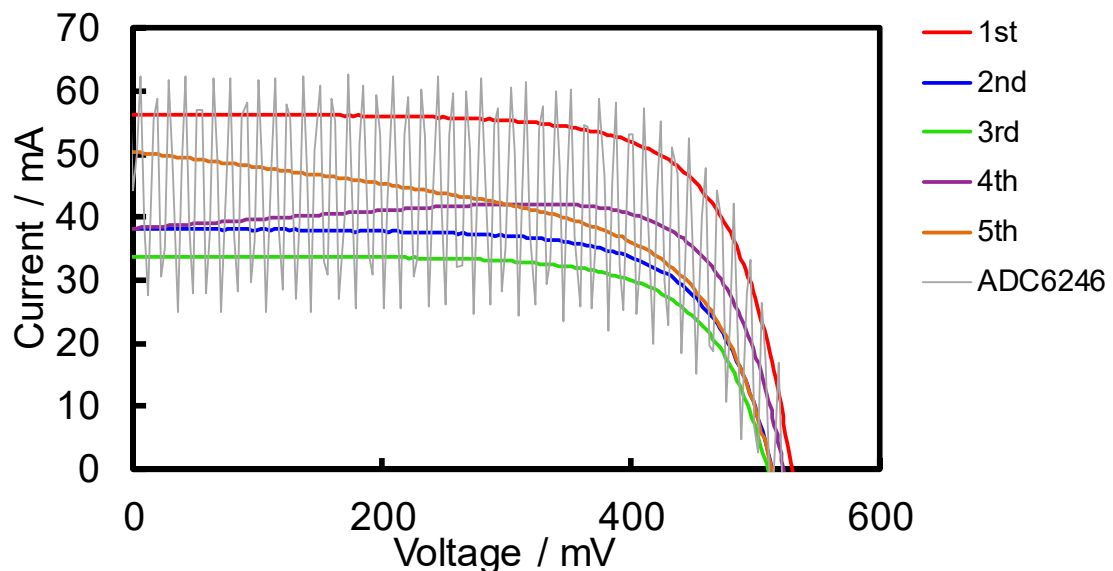
図 3-3-1 交流電源で駆動する照明器具下での I-V 測定結果

(ADC6246 を使用した場合)

現在はこのように収束した値を真値として扱っている。ADC 社製 6246 型ソースメーターと山下電装社製ソフトウェアの組み合わせは、積分時間が短いときは交流電源の周波数を受けるので、むしろ間違いに気づき易いという長所がある。



(a) 規則性のない I-V 測定結果



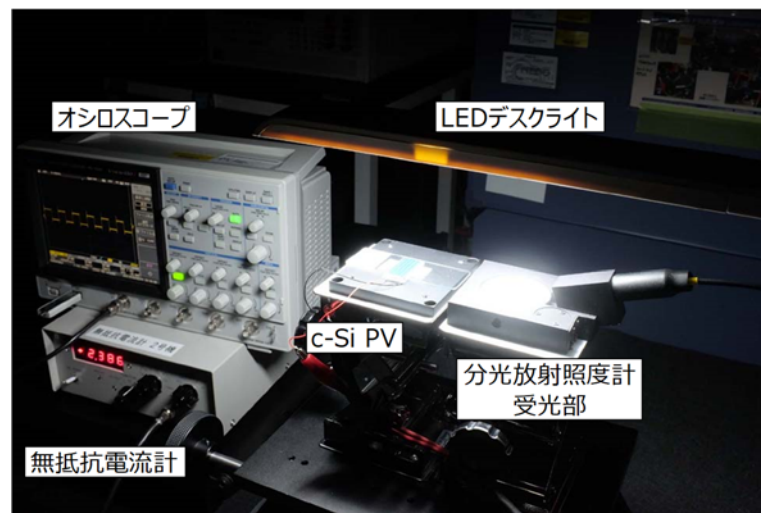
(b) ADC6246 による測定結果との比較

図 3-3-2 定常光のみを対象としたソースメーターによる測定結果

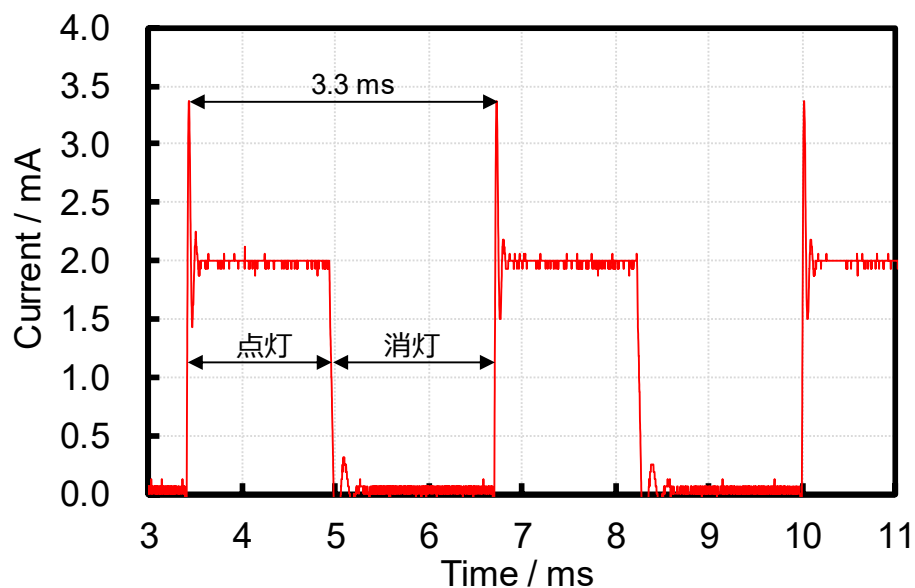
しかし、機種によってはこのような問題が分かりにくいものがある。図 3-3-2 は別メーカーのソースメーターによって同じ p-Si PV の I-V 測定を行った結果だが、この機種は太陽光もしくはソーラシミュレータによる定常光のみを対象としており、サンプリング間隔が $21.333\mu\text{s}$ 、積算時間が約 5.5ms と固定されてしまい、測定条件を細かく制御できない。従って、交流電源を使用した場合には(a)に示すように再現性に乏しい結果となる。(b)は ADC6246 を使用して積分時間を短くした場合に得られた結果を重ね合わせたものである。この比較実験では照射光量を揃えてあるので、ADC6246 で得られた振幅内のどこかを通ることとなる。4 回目の測定結果（紫色）は I-V 曲線が最大出力点付近で不自然に持ち上がる傾向を示しているが、その他の結果は違和感を覚えない可能性がある。また 1 回目の結果（赤色）は真値（図 3-2-1(c)の結果）よりも高く、3 回目の結果（緑色）は低い値となっている。このような測定機器を使用した場合、測定開始のタイミングによっては振幅の高い部分だけをトレースし、見かけ上性能が高く表示される可能性があるため注意が必要である。このような場合も、条件を変えて、且つ複数回の測定を行うことにより不自然な点がないような実験を行うことが重要である。

3-4 調光機能付き LED 照明器具の照度測定と I-V 測定

市販の LED 照明器具の中には点灯と消灯をパルス波で制御して光量調整する機種があり、その発光状態はこれまで検討していた通常の 50/60Hz に由来する正弦波とは異なる。パルス制御された照明器具の発光状態を測定するための実験機器と得られた波形を図 3-4-1 に、調光の度合いを変化させた際の発光挙動を図 3-4-2 に示す。



(a) 照度測定のための実験機器



(b) オシロスコープにより得られた発光挙動

図 3-4-1 パルス波で調光制御する LED 照明器具の発光挙動（約 50%に調光した例）

この実験は図 3-2-1 と同じように照明器具の光を受けた c-Si PV が発生する電流を測定したものである。使用した照明器具（松木技研社製 MDL-LE841 型デスクライト）は調光の状態を定量的に制御できない機種であるため、オシロスコープ目盛りから概ねの制御量を読み取った。その結果、この機種は光量制御のパルス周期は約 3.3ms と算出され、300Hz で制御されていることが判明した。

このデスクライトを約 50% に調光した状態で図 3-2-4 と同様に照度測定が可能かを確認した結果を図 3-4-3 に示す。図 3-4-1 より 3.3ms の周期と算出されたため、3.3ms を中心に露光時間を変えてみたが、3.29ms における結果が最も変動が小さかった。この原因は明らかとなっていないが、調光のためのパルス発振器の精度が原因でないかと予想される。

ソーラーシミュレータのような精度を持たない照明器具を光源とする場合に不確かさをどの程度まで許容するかというのも今後の課題である。

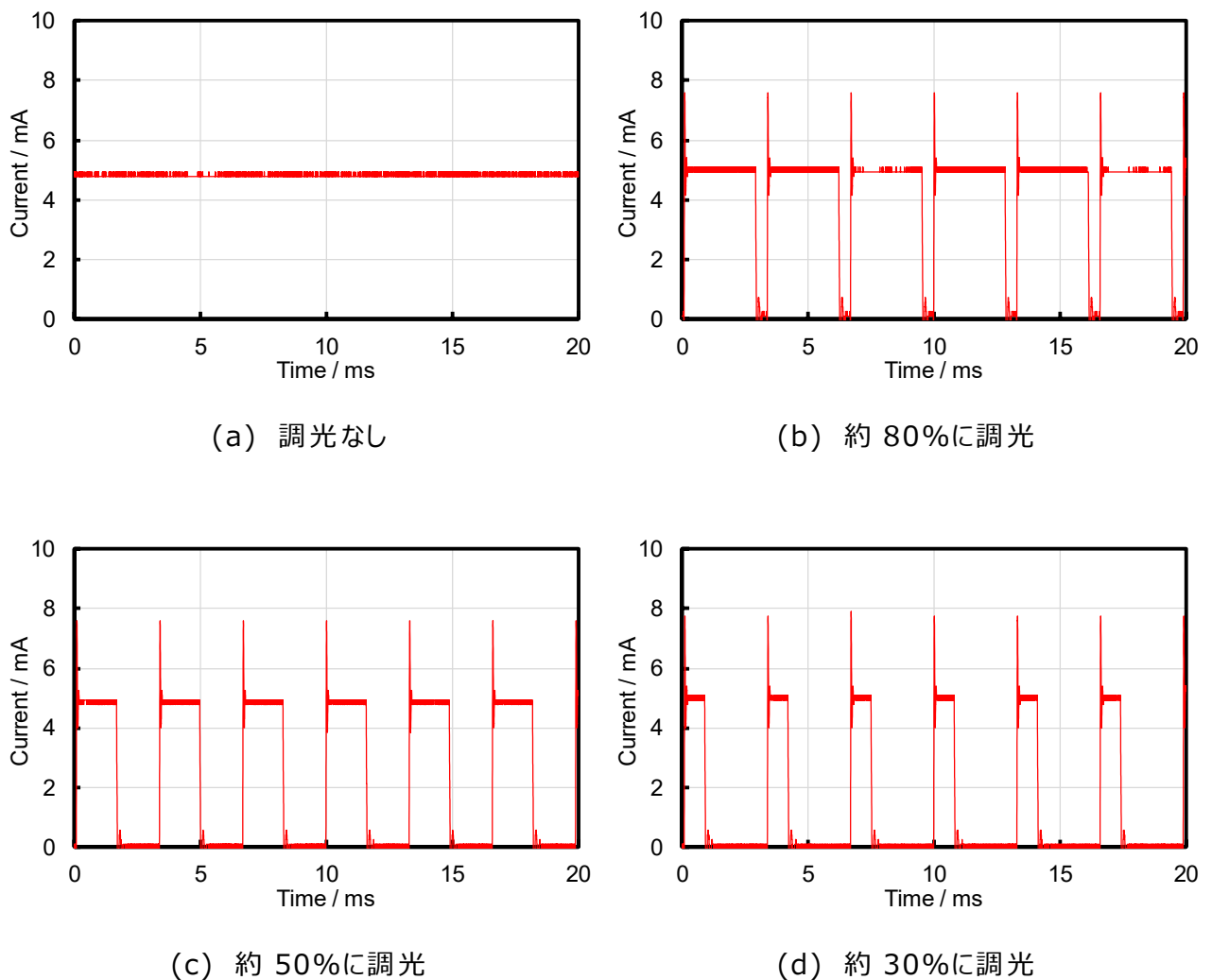
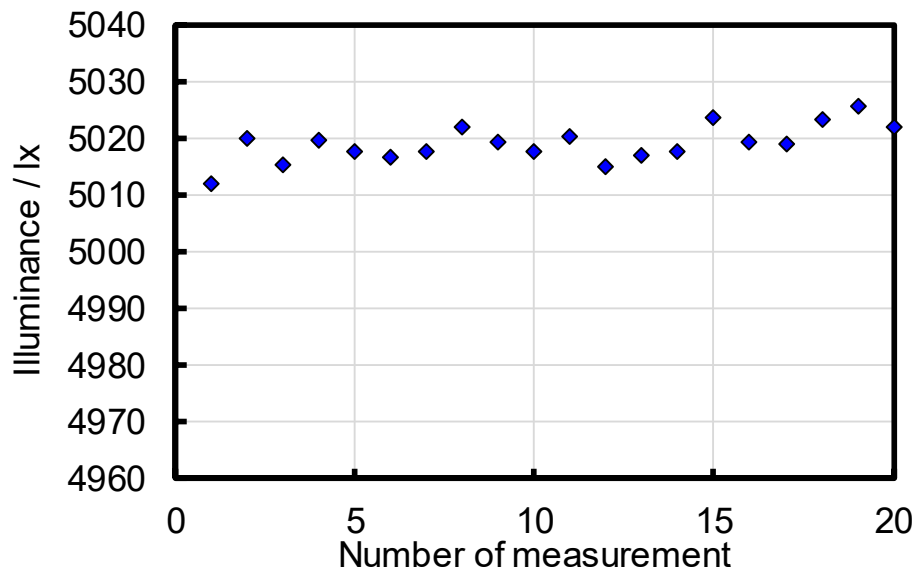
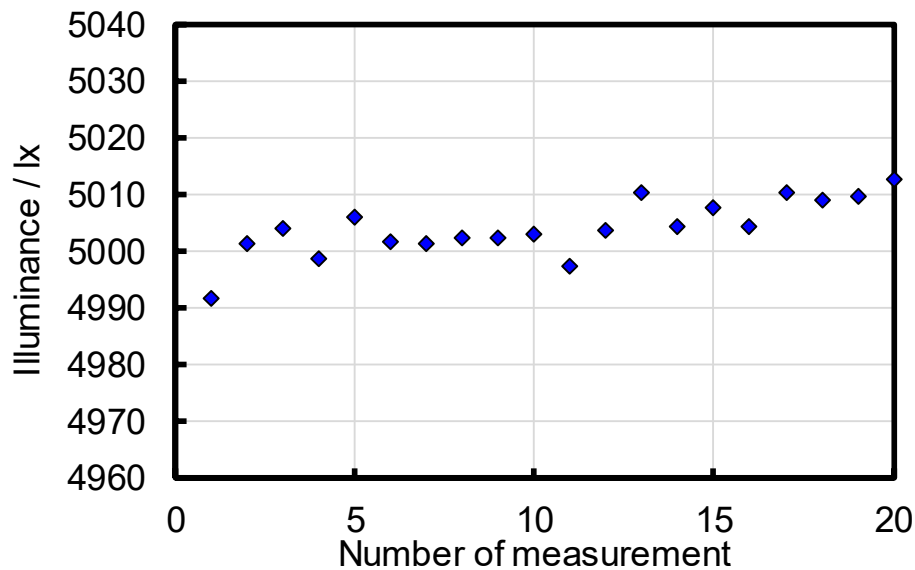


図 3-4-2 調光の度合いを変化させた際の発光挙動

さらに、この調光 LED デスクライト下で太陽電池が発電する挙動を I-V 曲線により評価可能かを確認した結果を図 3-4-4 に示す。図示したとおり、積分時間が短い場合 (1ms 赤色) は調光によるパルス波形の影響を激しく受けており、通常の交流周波数による影響 (図 3-3-1(a)) よりも振幅が大きい。また、パルス調光の場合は、完全に消灯する時間が存在するため、調光なし (青色) とダーク測定 (緑色) との間を行き来している様子が確認できている。



(a) 露光時間 32.9ms (標準偏差 3.18 lx)



(b) 露光時間 33ms (標準偏差 4.87 lx)

図 3-4-3 約 50%に調光した状態での照度測定結果

調光した場合の I-V 測定は図 3-3-1 に示したように、積分時間を周期の整数倍にするのが望ましいのだが、KISTEC で所有している機器では 3.3ms の倍数に設定できなかった。そのため、積分時間を変化させて明滅の影響をどの程度軽減できるか検討した。結果を図 3-4-5 に示す。

積分時間を 100ms まで延長しても 10ms 時の結果と大差なく、さらに延長した 200ms および 400ms では低減していくことは確認できたが、完全に平滑な I-V 曲線を得ることはできなかった。

交流周波数による揺らぎは積分時間を周期の倍数に設定することで除去することができた（図 3-3-1）が、調光 LED 照明下では同じ考えが通用しないことが明らかとなった。

今回の実験では調光の度合いを複数試してみたが、どの条件でも平滑な I-V 曲線を得ることが出来なかった。通常の交流周波数の揺らぎだけでは照明が消灯するまでは至らず、明るさの変化にとどまっている。しかし、パルス波による LED 照明の調光は一時的に消灯する「完全な点滅」であるため影響が大きい。さらに、調光の周期が機器それぞれで異なっている可能性も高く、今回のように積分時間を周期の整数倍に設定できない場合の方が多いと予想される。

今後は得られた I-V 曲線を計算により平滑化する手法などを含めて継続して検討していく予定である。

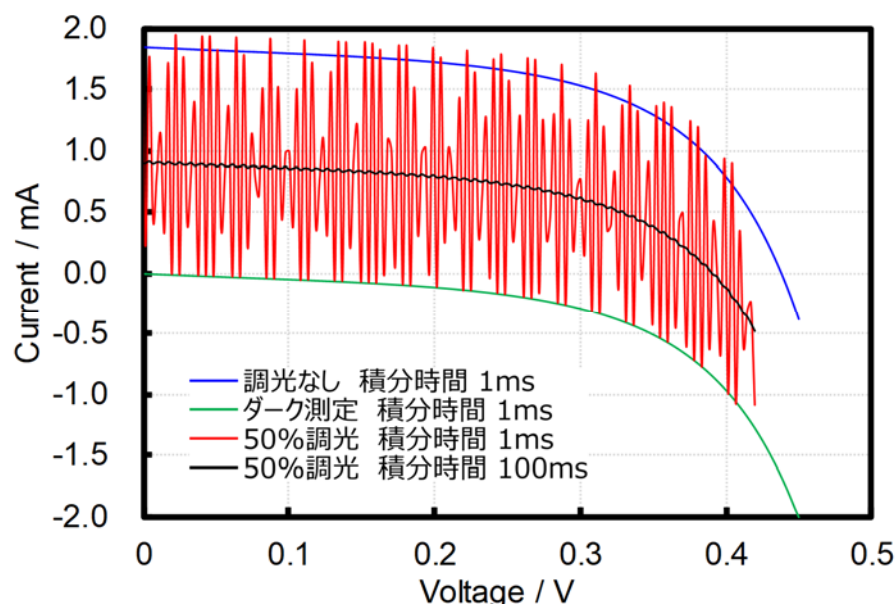
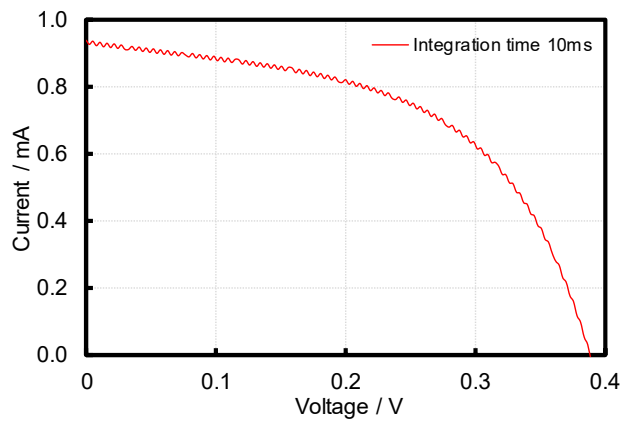
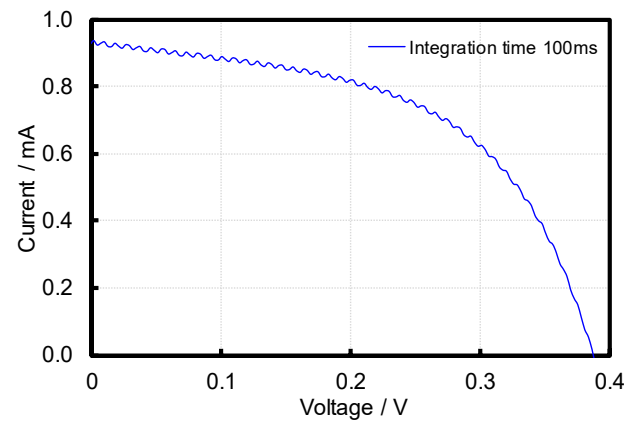


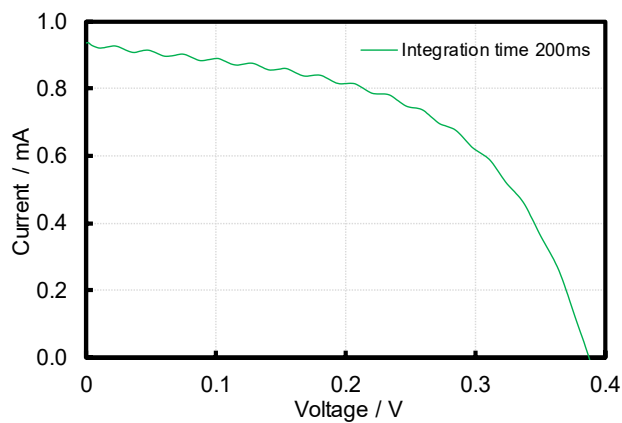
図 3-4-4 調光 LED 照明下での I-V 測定例



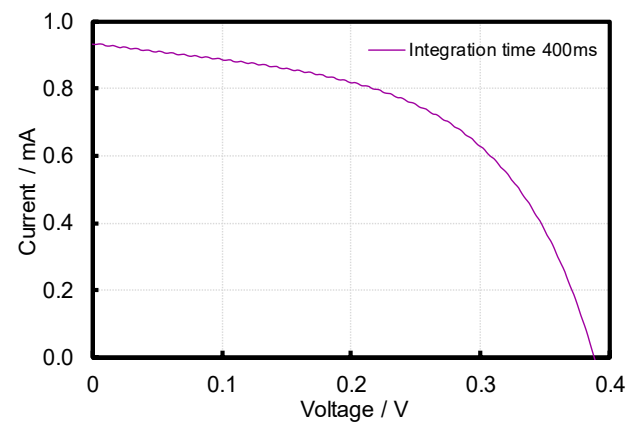
(a) 積分時間 10ms



(b) 積分時間 100ms



(c) 積分時間 200ms



(d) 積分時間 400ms

図 3-4-5 調光 LED 照明下での I-V 測定結果
(約 50%調光状態における積分時間の影響)

3-5 低照度 LED 室内光シミュレータの開発

前項までに述べたように、室内利用を想定した低照度環境下での太陽電池評価は注意すべき点が多い。有機太陽電池を普及させるためにも有機太陽電池の特徴を生かした評価法を確立することが必要である。交流電源の周波数に由来する揺らぎを排除し、入射光による発電性能のみを評価するためには専用の光源が必要であると考えた。本研究では LED を光源とした低照度評価装置を作製し、その有効性を確認できたのでここに報告する。

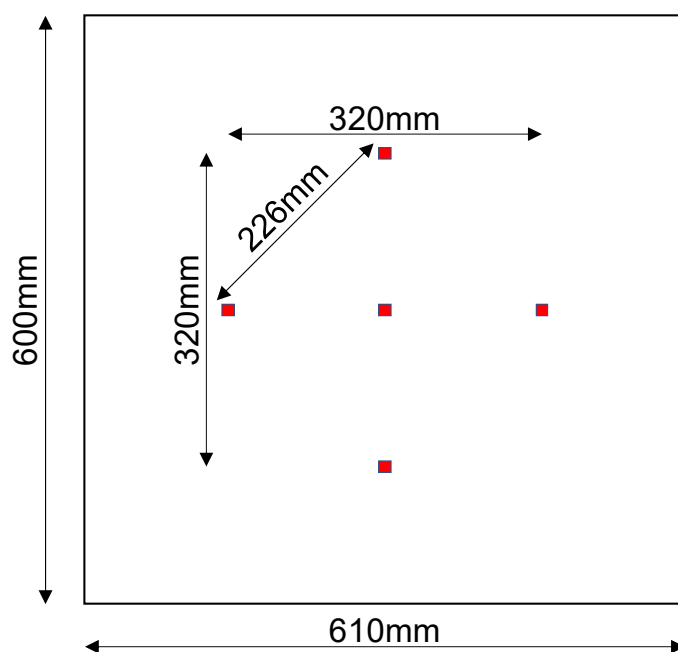
室内に使用される照明器具として、現時点ではオフィスビルなどにおいては蛍光灯の方が多いようだが、一般家庭用照明や電車の室内灯として LED への代替が進んでいる。また、国内での蛍光灯生産が縮小しているなど今後は LED が主力になるものと考えられる。そのため、今回作製した光照射装置では光源として LED を採用した。

当初は市販の LED 照明器具の使用も検討したが、組み込まれている LED 素子の素性が不明であるうえ、同じ型式の器具でも仕様が変更される可能性などを考慮して、素性の明確な LED 素子と安定直流電源を組み合わせて構成することとした。LED 素子は世界でも最大級の製造会社である日亜化学製品の中で照明用として普及している 757 型 LED を選定した。

低照度評価装置は KISTEC で仕様を決定し、セルシステム社に作製を依頼した。光源部は 5 つの LED 素子を、アルミニウム板上の 4 つの頂点 (226mm×226mm) と対角線の交点に配置した。不要な反射を防止するため、アルミニウム板に反射防止布を貼ってから LED を固定してある。LED 素子の配置と点灯した状態を図 3-5-1 に示す。また、図 3-5-2 に示すように LED 素子と電源を別体で構成しているため十分な冷却効果を得ることができ、温度上昇による照度変動を抑制している。この LED 光源下で c-Si PV から発生された電流の挙動は図 3-5-3 に示すように全く揺らいでいない安定したものとなった。

光源を組み込んで性能評価を行う測定用暗箱も製作した。図 3-5-4 に 3D-CAD 図面を示す。LED 素子を搭載した光源板の高さをベルト駆動により約 1800mm の範囲で連続的に変化させる機構を組み込み、DC 電源の電流制御と併せて任意の照度を設定することができる。また、暗箱の底面には図 3-5-5 に示すスライドレール機構が設けられている。この機構を用いることにより、分光放射照度計と太陽電池セルを 1 回の動作で同じ位置に設置することが可能となる。現在使用されている試験用太陽電池の多くは、 100mm^2 (1cm^2) 以下の小さな面積であり、このような小型太陽電池の場合、わずかな位置ずれでも出力が大きく変動する傾向がある。この機構を用いることにより、位置決めの再現性を大幅に向上させることができた。この暗箱には英弘精機社製の小型分光放射計 MS-720 を組み合わせて使用する。

この分光放射計は、リモート操作に加えてインターバル測定を行うことができるため、長時間にわたる連続測定に有効である。



(a) LED の配置図



(b) 5 個の LED が点灯した状態

図 3-5-1 LED シミュレータの光源部分

図 3-5-6 に本評価装置の分光放射照度と温度を示す。比較用として市販 LED 電球（東芝製 LDA6N-H 型）の測定結果を図 3-5-7 に示す。分光放射照度は英弘精機 MS-720 で、温度は熱電対により測定した。

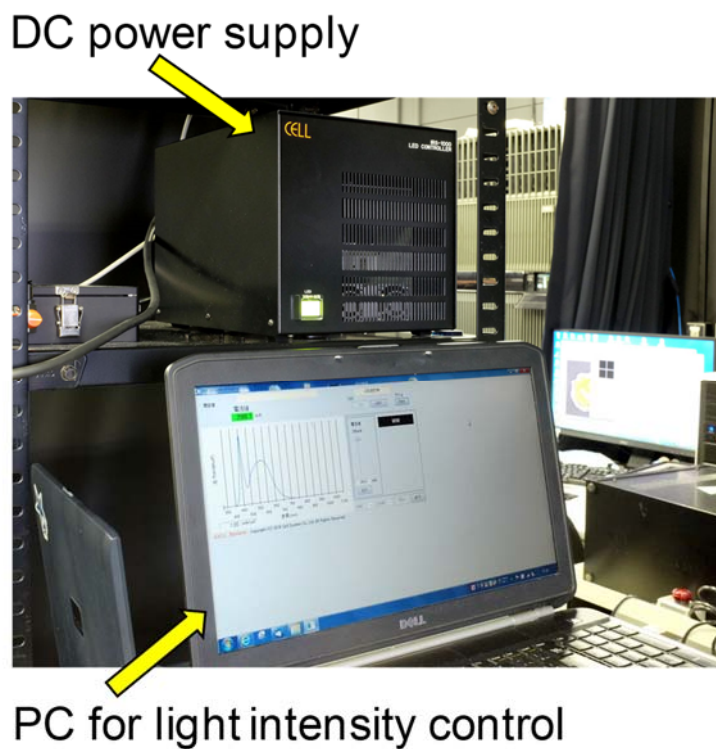


図 3-5-2 LED シミュレータに電力を供給する安定化直流電源と出力制御用 PC

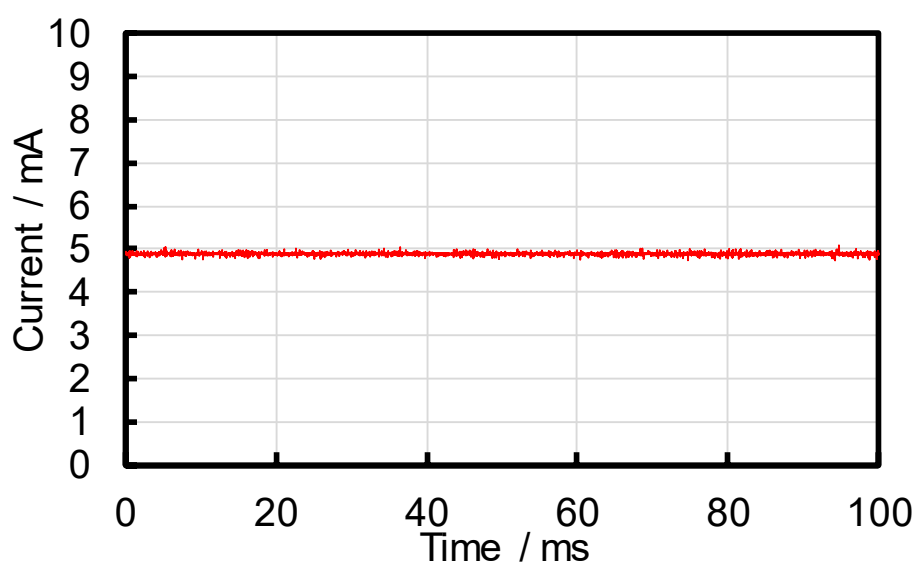


図 3-5-3 交流周波数に起因する揺らぎを排除した安定な光

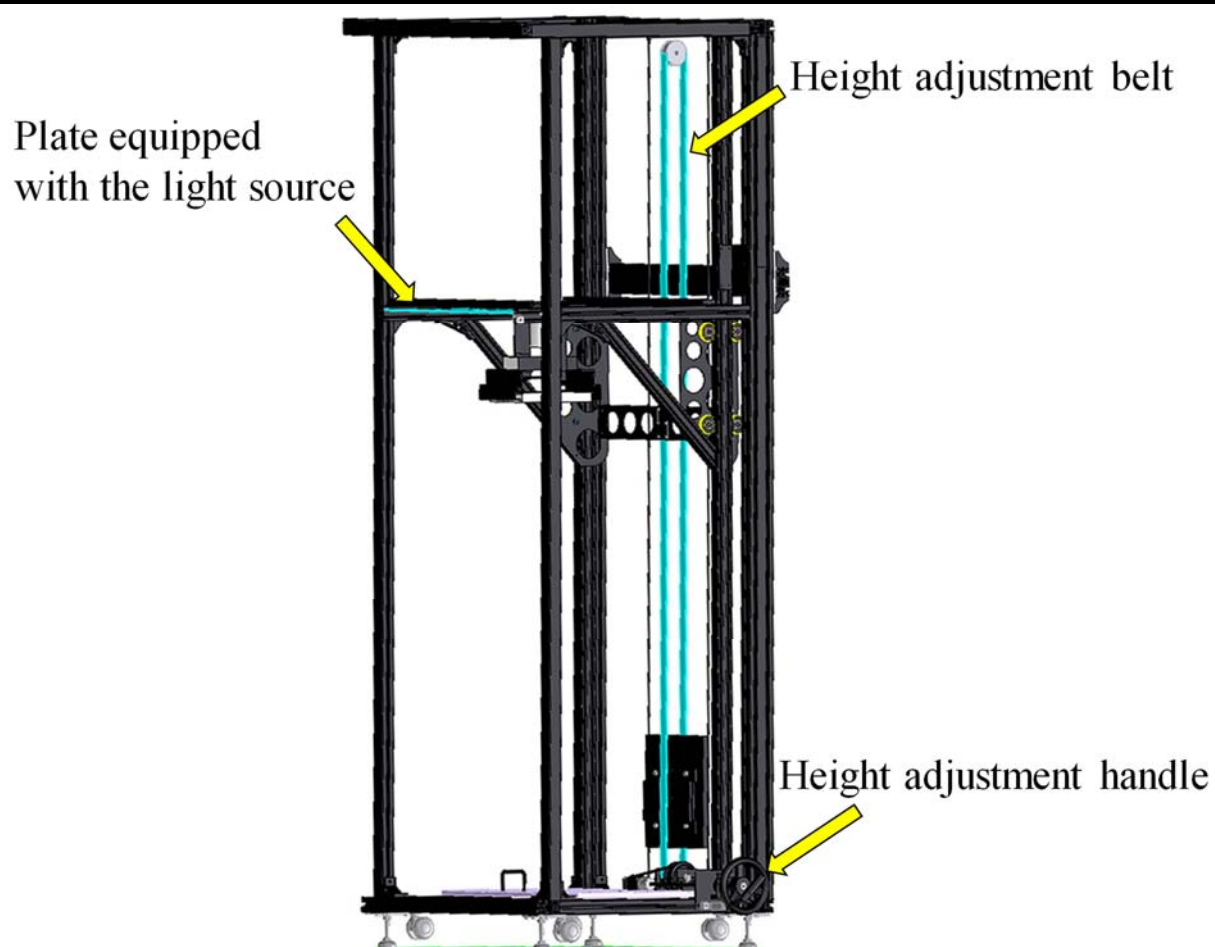
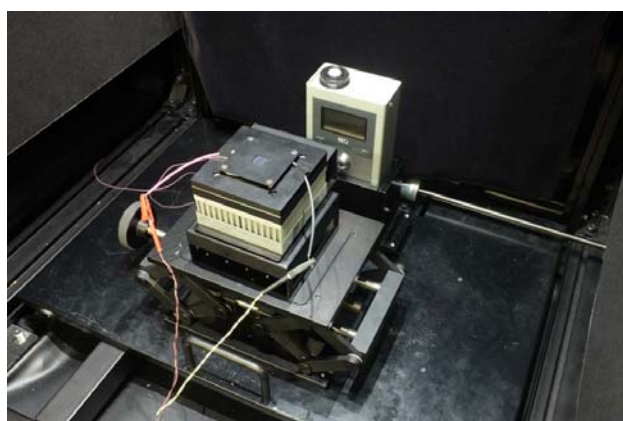


図 3-5-4 測定装置の 3D-CAD

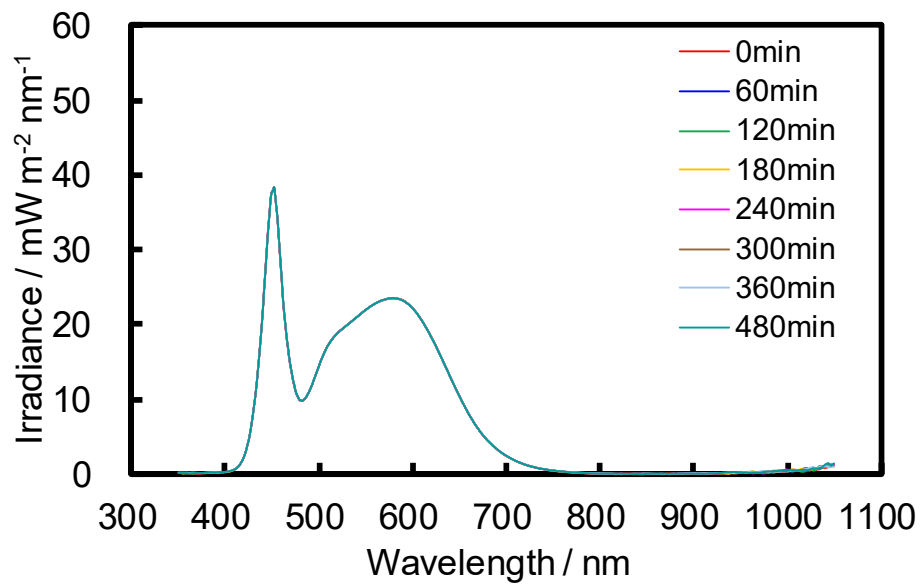


(a) セル位置が照射中心の状態

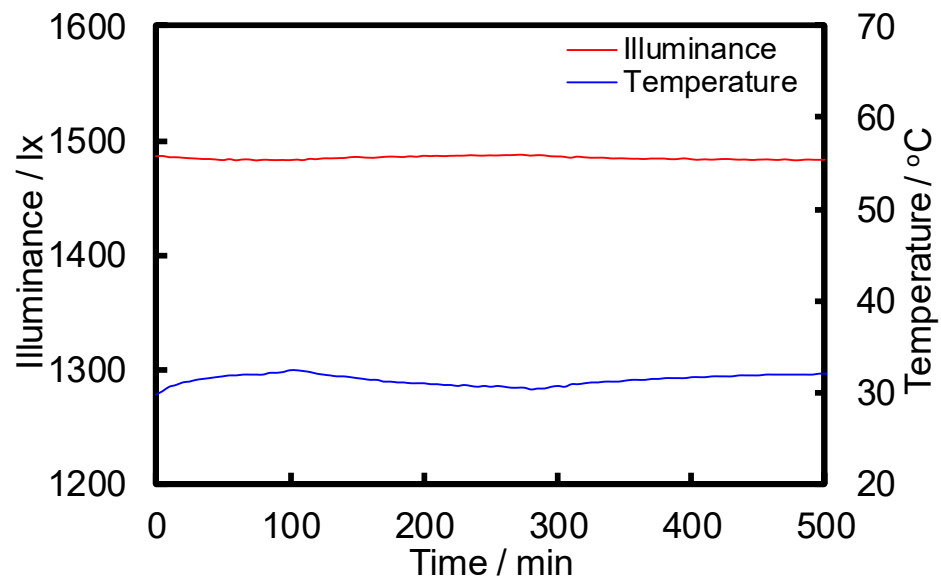


(d) 照度計が照射中心の状態

図 3-5-5 スライドレールによる試料位置決め機構

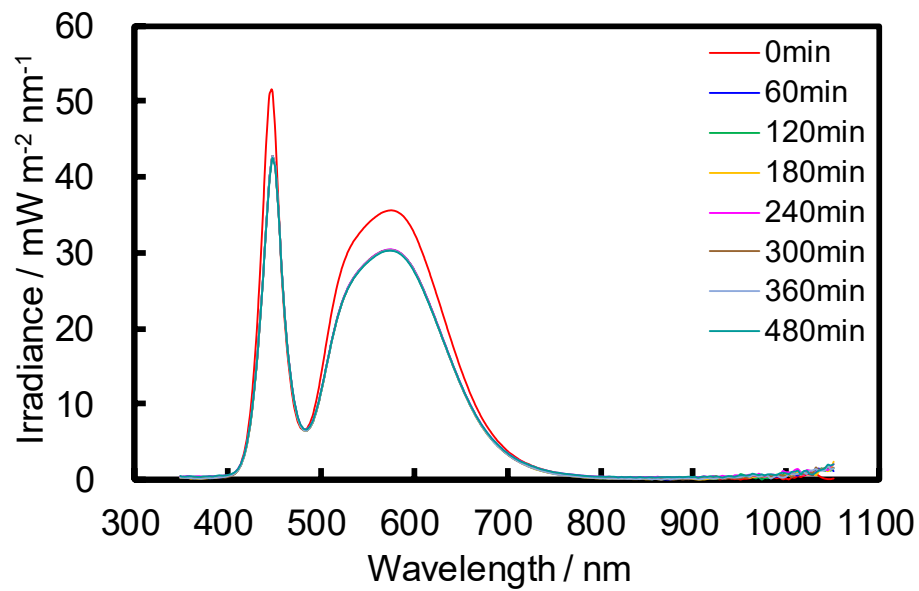


(a) 分光放射スペクトルの時間変動

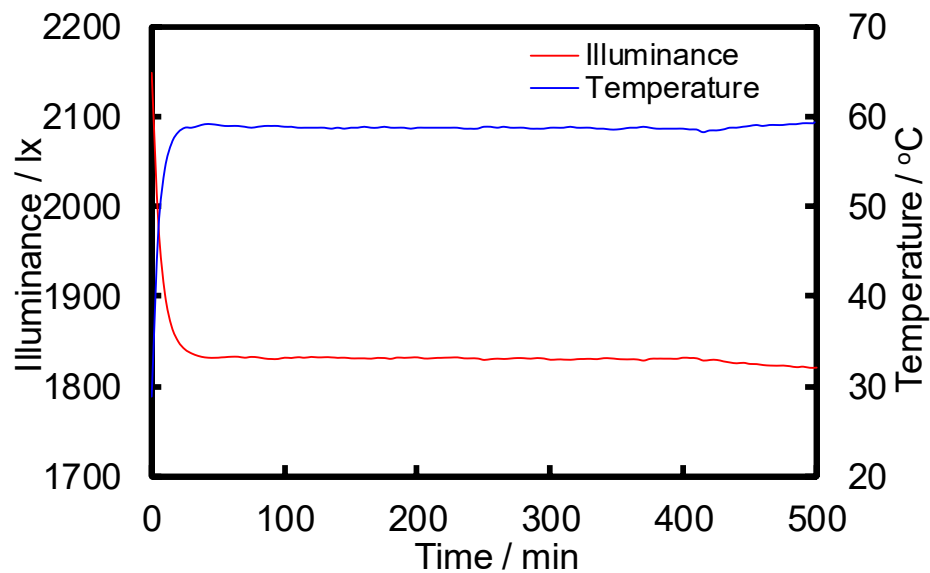


(b) 照度と温度の時間変動

図 3-5-6 LED シミュレータの分光放射照度および光源部分の温度変化



(a) 分光放射スペクトルの時間変動



(b) 照度と温度の時間変動

図 3-5-7 市販 LED 電球の分光放射照度および光源部分の温度変化

本装置は、供給している電力の安定性および放熱性の向上により、8 時間以上の作業時間中にスペクトル放射照度、強度および温度がほぼ一定のままであった。点灯から 500 分後までの最大照度は 1487.19 lx、最小照度は 1482.81 lx であり、式 1 から計算された時間変動率は 0.15% であった。これに対し、市販 LED 電球のスペクトル、照度、温度は点灯後約 15 分で急激に変化し、その間の変動率は 7% と非常に大きいものであった。また、比較的安定した 15 分後から 500 分後でも 1.24% の変動が確認された。

LED 光源から照射される光は赤外領域を含まないので照射対象物の温度は上昇しないが回路の発熱は避けられない。特に電球型の LED 光源は限られたスペースに回路を組み込んでいるため発熱の度合いが大きく、この熱が照度の変動を招いたものと考えられる。

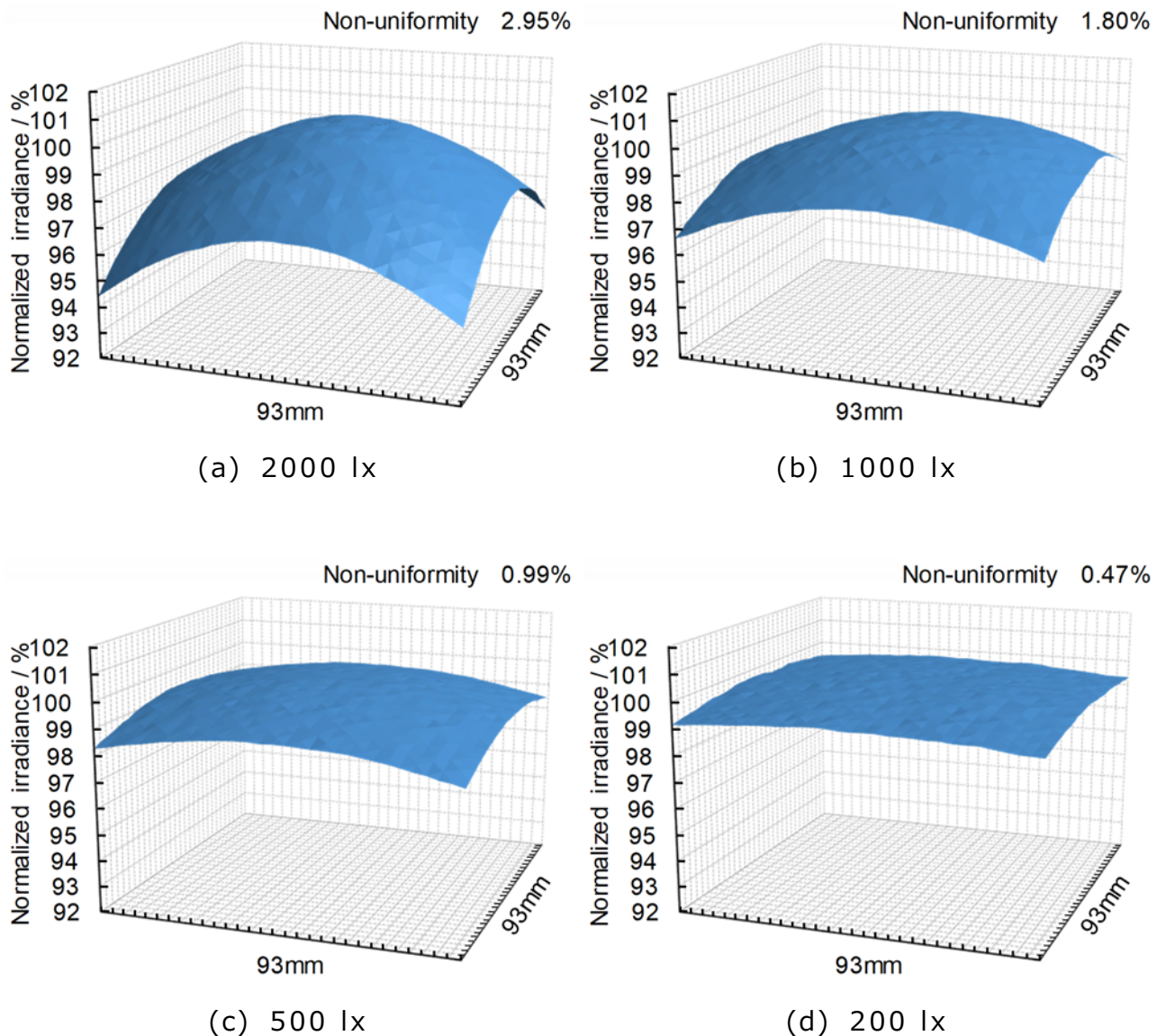


図 3-5-8 各照度における面内均一性

(測定面の中心を 100%としたときの分布)

IEC 60904-9[31]で規定されているクラス A ソーラーシミュレータの時間変動率の許容値が 2%以下であることを考慮すれば、この結果は十分に満足できるものである。

図 3-5-8 は、FA システムズ社製照度分布測定装置により測定された本装置の面内照度分布である。IEC 60904-9[31]で規定されているソーラーシミュレータの面内均一性許容値は、クラス A に対して 2%、クラス B に対して 5%、クラス C に対して 10%である。本 LED 光照射装置で照射面積を 93mm×93mm とした場合、照度 200, 500, 1000, 2000 lx において、面内均一性は 0.47%, 0.99%, 1.80%, 2.95%の値を得ることができ、1000 lx 以下であればクラス A を、2000 lx 以下であればクラス B を満たせることが明らかとなった。

図 3-5-9 は照度と面内均一性の関係であるが、照度が高くなるほど面内均一性が悪くなるのは光源板と被測定セルとの距離が短くなるためである。現在、次段階への改善として 5000 lx においてクラス A を満たすことを目標として LED の数を増やした光源板を設計中である。

なお、本装置は Iris-S T2500 という名称を付け評価用装置として使用を開始している。また、太陽電池の評価装置として実用新案登録（登録番号：実用第 3203433 号，出願番号：実願 2016-000183）も済ませてある。

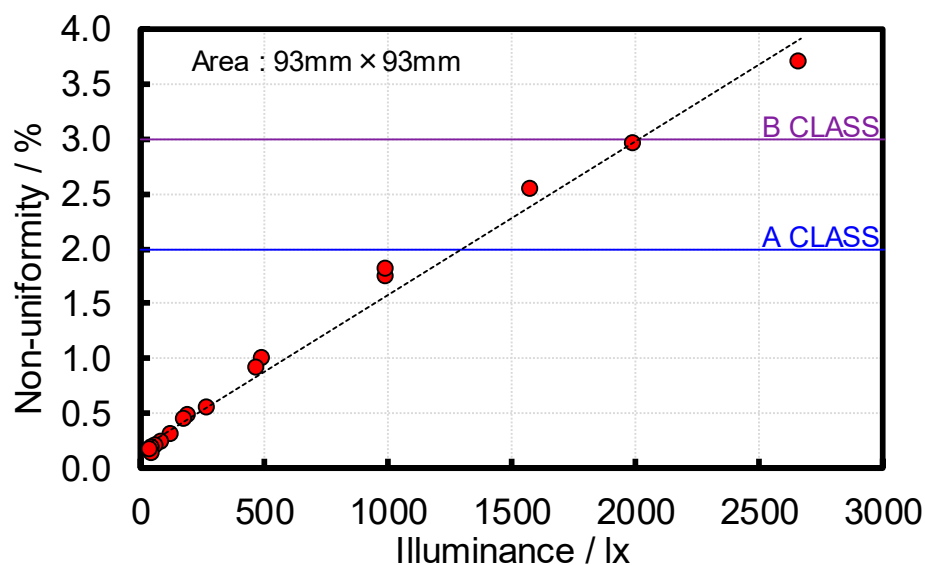


図 3-5-9 照度と面内均一性の関係
(測定範囲：93mm×93mm)

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 登録実用新案公報 (U)

(11) 実用新案登録番号

実用新案登録第3203433号
(U3203433)

(45) 発行日 平成28年3月31日 (2016. 3. 31)

(24) 登録日 平成28年3月9日 (2016. 3. 9)

(51) Int. Cl.

H02S 50/10

(2014.01)

F 1

H02S 50/10

評価書の請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 実願2016-183 (U2016-183)
(22) 出願日 平成28年1月15日 (2016. 1. 15)

実用新案法第11条において準用する特許法第30条第2項適用申請有り (1) 平成27年7月16日に開催された学振第175委員会 有機系太陽電池分科会 第2回研究会にて口頭で発表 (2) 平成27年7月29日に開催された平成27年度KAST研究報告会にてポスターで発表 (3) 平成27年7月29日に発行されたKAST平成26年度研究概要にて発表

(73) 実用新案権者 591243103
公益財団法人神奈川科学技術アカデミー
神奈川県川崎市高津区坂戸3丁目2番1号
(74) 代理人 100064908
弁理士 志賀 正武
(74) 代理人 100108578
弁理士 高橋 昭男
(74) 代理人 100094400
弁理士 鈴木 三義
(72) 考案者 斎藤 英純
神奈川県川崎市高津区坂戸三丁目2番1号
公益財団法人神奈川科学技術アカデミー
内

(54) 【考案の名称】 太陽電池の評価装置

(57) 【要約】

【課題】 太陽電池の特性の評価における信頼性を高めることができる太陽電池の評価装置を提供する。

【解決手段】 太陽電池ユニット30が載置される載置部1と、載置部1に対して接近および離間する方向に移動可能とされた照射部2と、照射部2を案内するガイド部3と、載置部1に対する照射部2の位置を調整する位置調整機構4と、試験光が照射された太陽電池ユニット30の特性を測定する測定部7と、光源13に電力供給する電力供給部8と、を備えた太陽電池の評価装置10を提供する。載置部1は、光源13に接近および離間する方向に対して交差する方向に太陽電池ユニット30をスライド移動させるスライド移動機構を有する。照射部2は、光源13との間で熱伝導により熱の授受が可能な放熱部14を備えている。位置調整機構4は、照射部2の移動可能範囲の任意の位置で照射部2を位置決め可能とされている。

【選択図】 図1

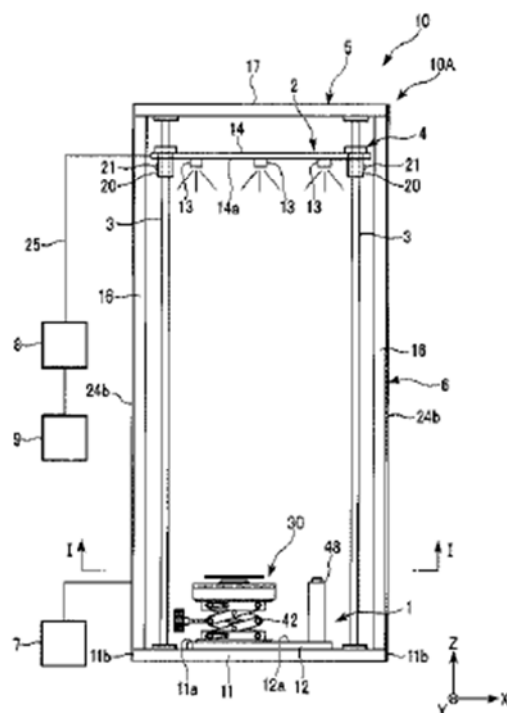


図1

図 3-6-10 登録実用新案公報 (抜粋)

3-6 低照度 LED 室内光シミュレータによる実使用環境の再現試験

これまでの実験において、交流電源による揺らぎを有する光源下では揺らぎの周期よりも長く適切な時間で照度測定と I-V 測定を行うことが重要であることが明らかになった。

しかし、実環境においては周囲から入射する光や主に温度に由来する照度の変動など不安定な要素を完全に取り除くことができない。しかし、今回開発した LED 室内光シミュレータを使用して交流駆動光源と同等の環境を再現できれば、より安定した性能評価が可能となると考え、実環境との整合性に関する実証を試みた。また、照明器具によって分光放射スペクトルが多少変わっていても、入射エネルギーを揃えれば、発電挙動が再現できるという仮定に沿って実験を行った。

実験の手順は以下の通りである。

- ① 交流電源で駆動する LED 光源を用意し、第 3 章・3-2 で述べた手順に沿って、複数回の測定で標準偏差が平均値の 0.2% 以下になるよう適切な露光時間で照度を測定する。条件を変えて検証するため、200 lx, 1000 lx の 2 水準で測定を行った。このとき得られた放射照度をそれぞれ $E_{AC1} \text{mWm}^{-2}$, $E_{AC2} \text{mWm}^{-2}$ とする。
- ② 上記①の状態では単結晶 Si PV (c-Si PV) と色素増感太陽電池 (DSC) に対して I-V 測定を行い、短絡電流 I_{SC} , 開放電圧 V_{OC} , 最大出力 P_{max} を記録する。
- ③ 本研究で作製した LED 室内光シミュレータを使用して E_{AC1} , E_{AC2} と同等の放射照度 E_{DC1} , E_{DC2} が得られるような光照射条件を設定する。
- ④ 上記③の状態と同じく c-Si PV と DSC に対して I-V 測定を行い、短絡電流 I_{SC} , 開放電圧 V_{OC} , 最大出力 P_{max} を記録し、②の交流駆動条件下における結果と比較する。

測定の結果を図 3-6-1 から図 3-6-4 および表 3-6-1, 表 3-6-2 に示す。

図 3-6-1 は放射照度を 0.058mWm^{-2} に合わせた場合のスペクトルおよび照度測定結果である。(a)に示すように光源のスペクトルが異なるため、(b)に示すよう照度が異なる。交流駆動の AL-50FL が 198 lx、直流駆動の Iris-S が 182 lx と約 8% の差が生じている。この状態で I-V 測定を行った結果を図 3-6-2 に示す。短絡電流に若干違いがあるが、概ねよく一致している。

同様に放射照度を 0.298mWm^{-2} に合わせた場合のスペクトルおよび照度測定結果を図 3-6-3 に、I-V 測定の結果を図 3-6-4 に示す。 0.058mWm^{-2} における結果に比べて短絡電流の差は小さく、DSC に関しては I-V 曲線がほぼ一致している。

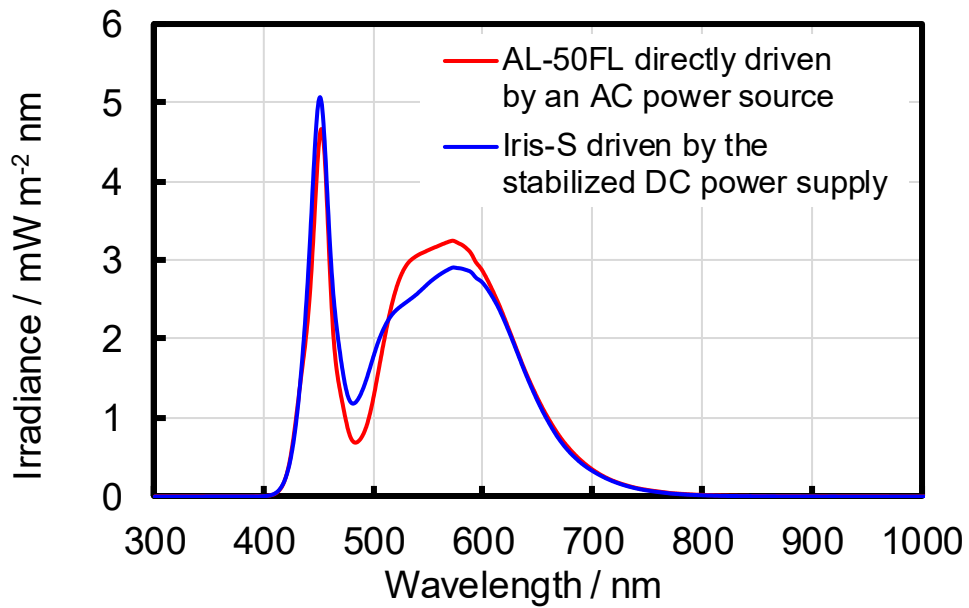
一連の実験で得られた数値をまとめたものを表 3-6-1, 3-6-2 に示す。

放射照度 0.058mWm^{-2} で得られた P_{max} の差は c-Si PV において-3.853%、DSC において-3.232%という結果となった。一方、放射照度 0.298mWm^{-2} では c-Si PV で-0.564%、DSC で 0.449%という結果になった。

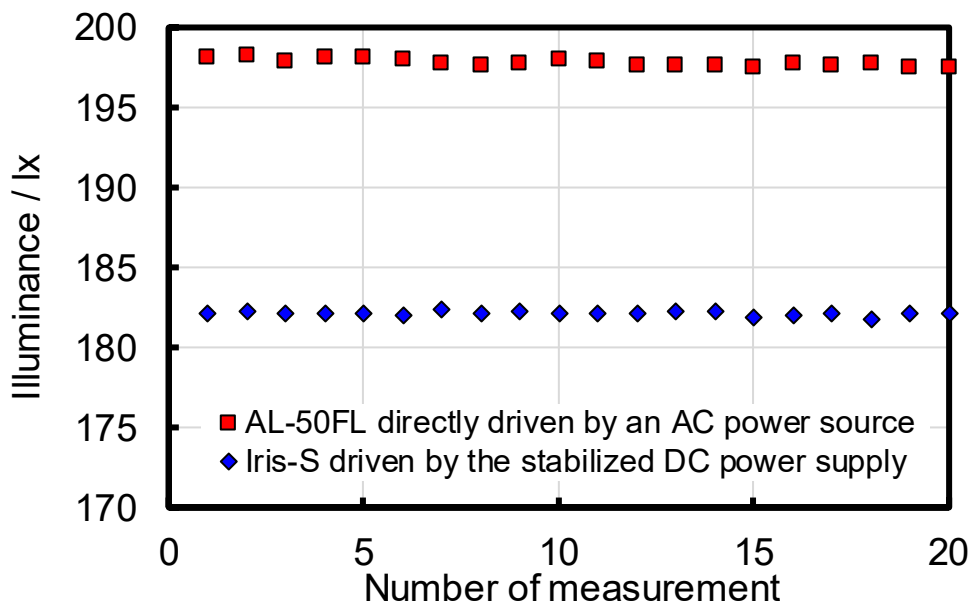
本実験では、照度が低い 0.058mWm^{-2} における差のがやや大きいがそれでも-3%程度に収まっている。

この差は主に I_{sc} の差に依存するものであった。受光素子の位置で測定した光量が同じでも、光源の大きさや光源と受光素子の距離の違いによって入射角が僅かに変わり、照度が低い分影響が大きくなっていることが原因と考えられる。この点は今後の課題として物理的な位置を極力揃えた条件で再度検証する予定である。

一方、照度が高い 0.298mWm^{-2} の条件で得られた P_{max} は c-Si PV、DSC ともに 1%未満の差にとどまり、非常に満足できる結果を得ることができた。これは使用した光源のスペクトルが比較的似ていたことに起因すると考えられる。今後は LED のみならず機種によるスペクトルの差が大きい蛍光灯にも対応できるようスペクトルミスマッチ補正の理論を取り入れ、さらに精度を高めていくよう検討を継続していく予定である。



(a) 0.058 mWm^{-2} における分光放射スペクトル



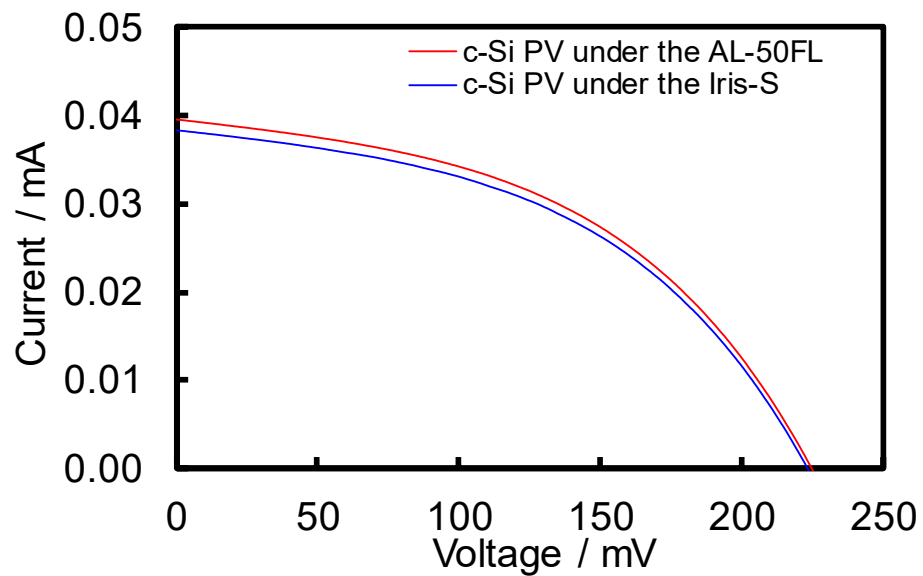
(b) 放射照度が同等となるような条件における照度測定結果

20 回測定の平均放射照度 $E_{AC1} = 0.057998 \text{ mWm}^{-2}$

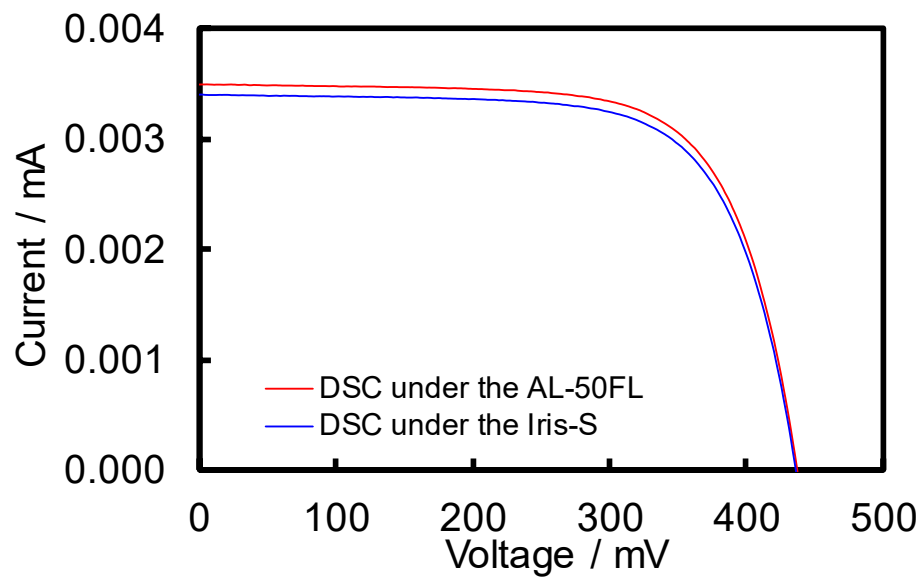
$E_{DC1} = 0.058037 \text{ mWm}^{-2}$

図 3-6-1 照射照度を 0.058 mWm^{-2} に揃えた状態（交流駆動光源で約 200 lx）

における直流/交流駆動光源の照度測定結果

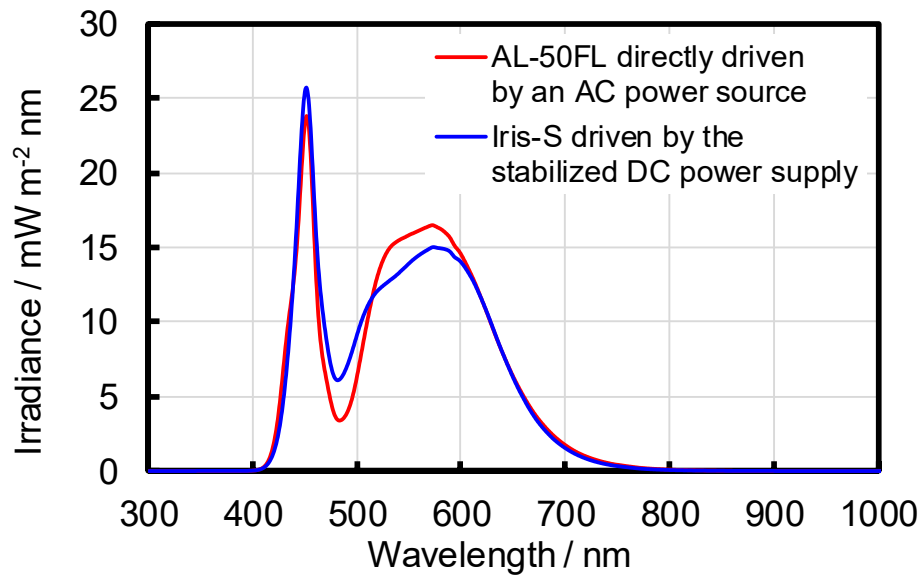


(a) c-Si PV

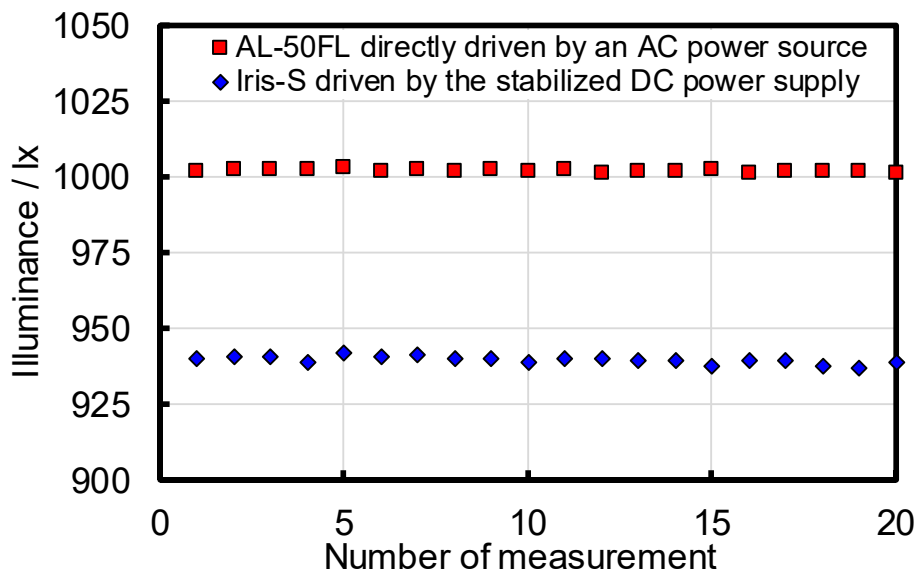


(b) DSC

図 3-6-2 0.058 mWm^{-2} 条件時の I-V 測定結果



(a) 0.298 mWm^{-2} における分光放射スペクトル



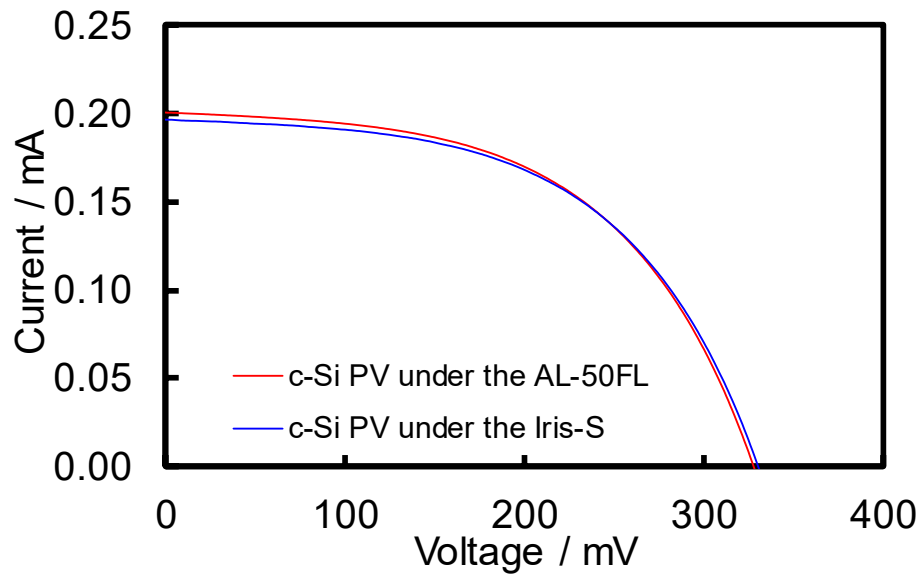
(b) 放射照度が同等となるような条件における照度測定結果

20 回測定の平均放射照度 $E_{AC2} = 0.298276 \text{ mWm}^{-2}$

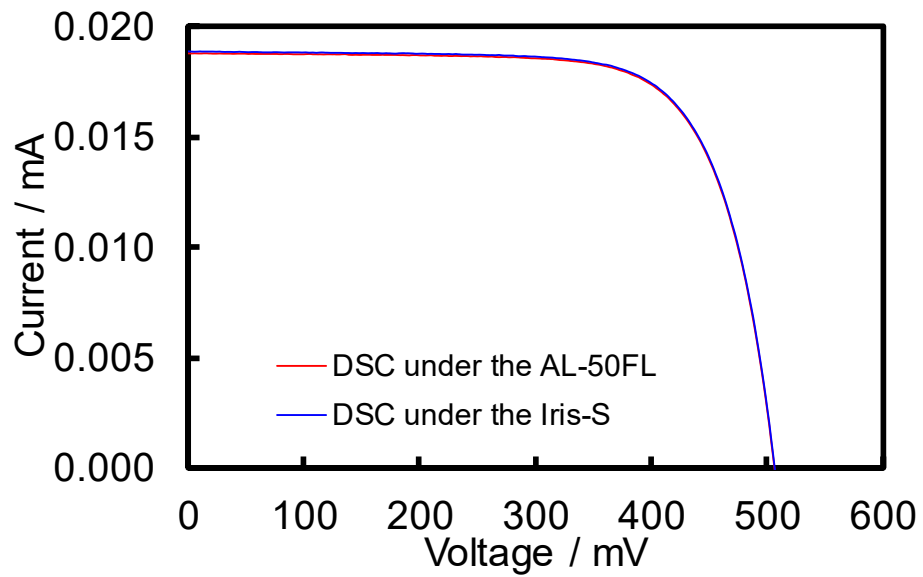
$E_{DC2} = 0.297416 \text{ mWm}^{-2}$

図 3-6-3 照射照度を 0.298 mWm^{-2} に揃えた状態（交流駆動光源で約 1000 lx ）

における直流/交流駆動光源の照度測定結果



(a) c-Si PV



(b) DSC

図 3-6-4 0.298 mWm^{-2} 条件時の I-V 測定結果

表 3-6-1 放射照度を 0.058 mWm^{-2} に揃えた場合における
交流駆動 AL-50FL 型 LED 照明と直流駆動 Iris-S による発電挙動比較

照射条件	受光素子	電気特性	AL-50FL	Iris-S	Difference
0.058 mWm^{-2}	c-Si PV	I_{SC}	$39.522 \text{ } \mu\text{A}$	$38.376 \text{ } \mu\text{A}$	-2.987 %
		V_{OC}	224.645 mV	223.107 mV	-0.689 %
		P_{max}	$4.103 \text{ } \mu\text{W}$	$3.951 \text{ } \mu\text{W}$	-3.853 %
	DSC	I_{SC}	$3.492 \text{ } \mu\text{A}$	$3.402 \text{ } \mu\text{A}$	-2.635 %
		V_{OC}	436.636 mV	435.682 mV	-0.219 %
		P_{max}	$1.069 \text{ } \mu\text{W}$	$1.036 \text{ } \mu\text{W}$	-3.232 %

※結果の差は交流駆動（AL-50FL）で得られた値を基準に算出したもの

表 3-6-2 放射照度を 0.298 mWm^{-2} に揃えた場合における
交流駆動 AL-50FL 型 LED 照明と直流駆動 Iris-S による発電挙動比較

照射条件	受光素子	電気特性	AL-50FL	Iris-S	Difference
0.298 mWm^{-2}	c-Si PV	I_{SC}	$200.491 \text{ } \mu\text{A}$	$196.285 \text{ } \mu\text{A}$	-2.143 %
		V_{OC}	328.081 mV	330.672 mV	0.784 %
		P_{max}	$35.068 \text{ } \mu\text{W}$	$34.871 \text{ } \mu\text{W}$	-0.564 %
	DSC	I_{SC}	$18.796 \text{ } \mu\text{A}$	$18.882 \text{ } \mu\text{A}$	0.454 %
		V_{OC}	507.338 mV	507.664 mV	0.064 %
		P_{max}	$6.980 \text{ } \mu\text{W}$	$7.011 \text{ } \mu\text{W}$	0.449 %

※結果の差は交流駆動（AL-50FL）で得られた値を基準に算出したもの

3-7 太陽電池の発電性能評価

本研究で開発した低照度 LED 室内光シミュレータ (Iris-S T2500) とソーラーシミュレータを使用して、各種太陽電池の性能評価を試みた。現在日本国内で、実用化・市販されている有機太陽電池は DSC のみであるため、測定対象は二次基準太陽電池 (KONICA MINOLTA AK-200)、市販されている多結晶 Si PV (p-Si PV) 2 種類、市販されているアモルファスシリコン太陽電池 (a-Si PV : パナソニック社製 アモルトン)、研究用に試作された DSC、市販されている DSC の合計 6 種類とした。

図 3-7-1 に Iris-S T2500 を使用して変換効率 PCE を測定した結果を示す。この低照度領域 (50~5000 lx) における変換効率を算出するための入力エネルギーには分光放射照度計で測定した分光放射照度を使用した。

Si PV のうち、最も性能が高い KONICA MINOLTA AK-200 は認証機関により値付けされた二次基準太陽電池であり、照度に対する直線性が再現されていることから、本装置を使用した測定が正しいことを示唆している。一方、市販されている多結晶 Si PV の中には低照度領域において非線形性を示すものがあることを確認することができた。

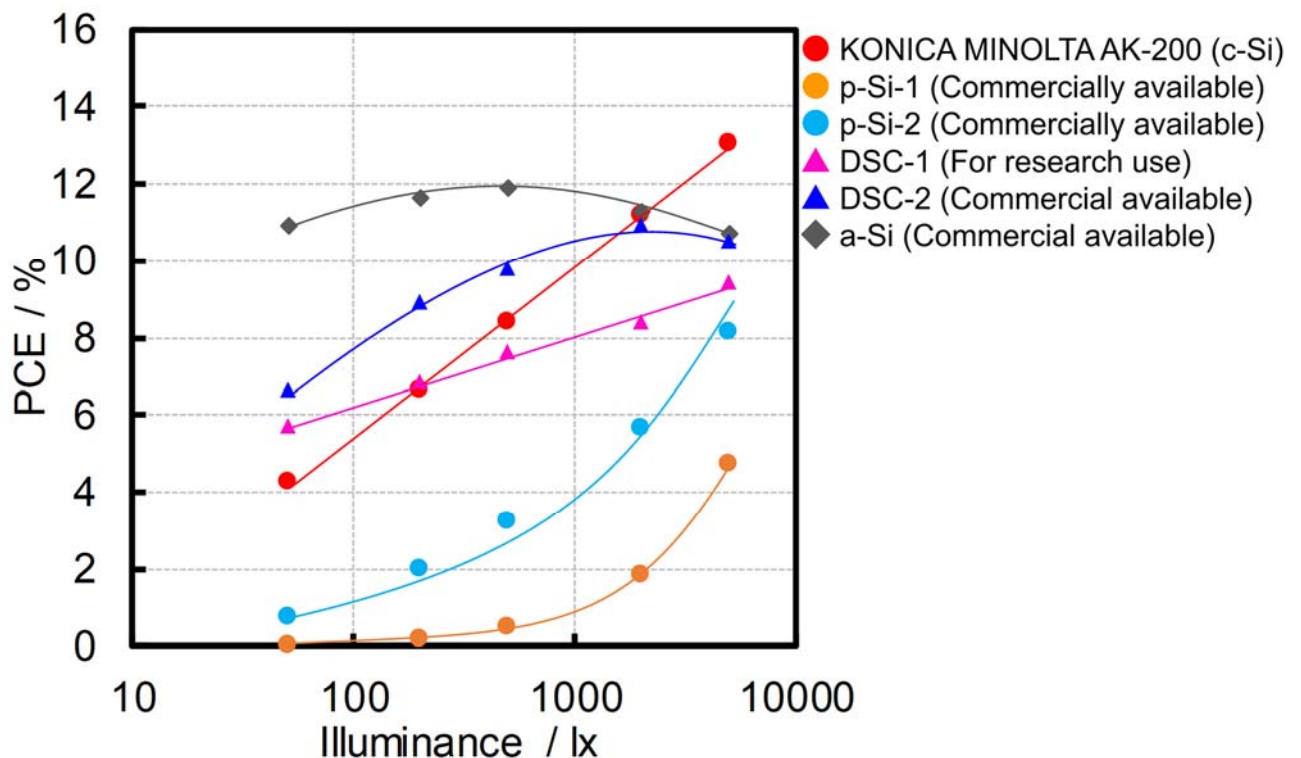


図 3-7-1 Iris-T2500 による低照度領域での変換効率 PCE

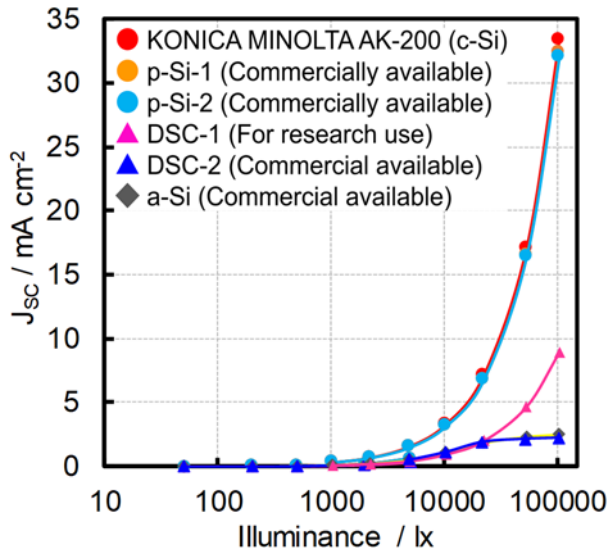
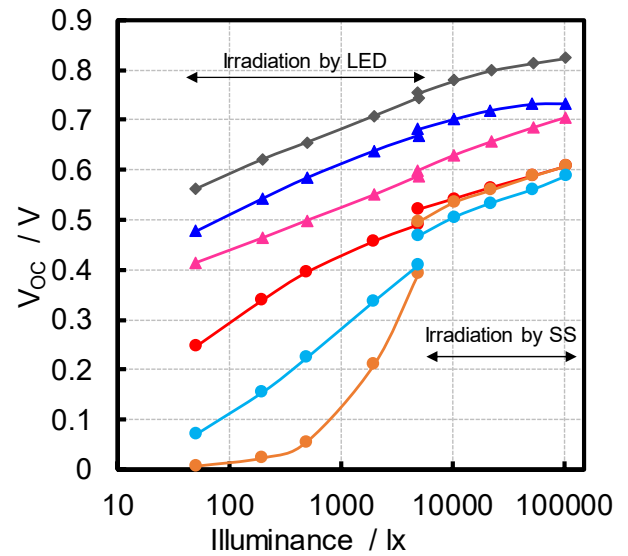
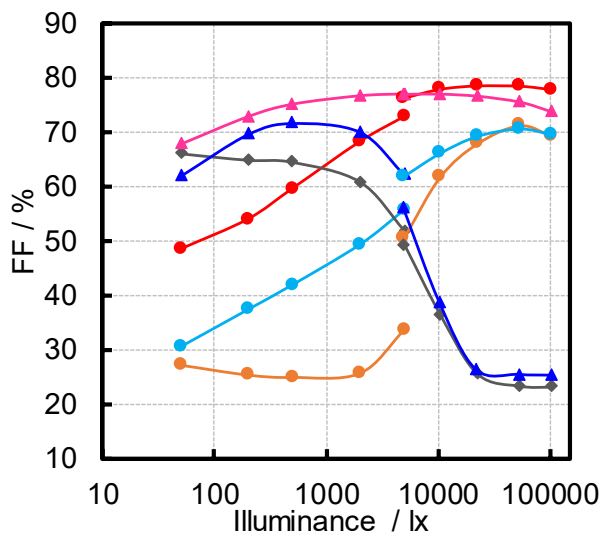
また、市販されている DSC は照度が高くなると変換効率が低下する傾向があるが、2000 lx 程度までであれば AK-200 よりも変換効率高く、室内利用向けに低照度領域での性能に特化したものであると推察される。さらに、5000 lx 程度までであれば、DSC は 2 種類とも市販されている多結晶シリコン太陽電池よりも高い変換効率を示している。使用環境によっては有機太陽電池の方が優位であることを確認することができた。

図 3-7-2 はソーラーシミュレータによる高照度領域も併せて評価した結果である。高照度領域（0.05～1sun）における変換効率の入力エネルギーは 1sun 時の 1000Wm^{-2} を基準にして、基準太陽電池 AK-200 の I_{SC} 値から算出した。

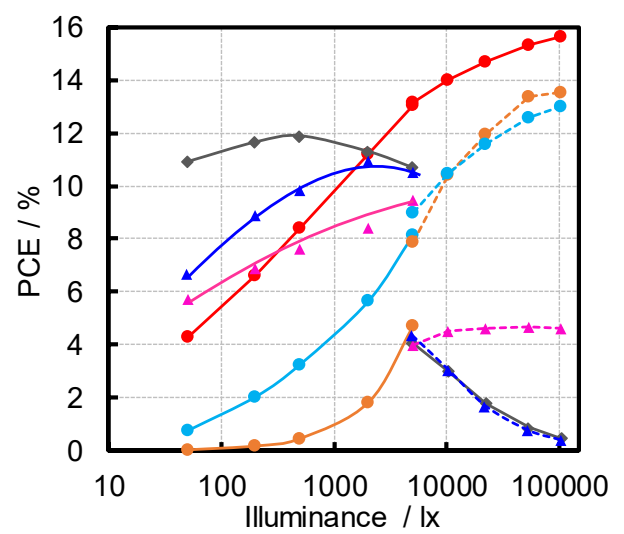
(a)に示したとおり、全てのセルにおいて短絡電流密度 J_{SC} は照度の低下に伴い減少している。しかし、(b)と(c)に示すように、開放電圧 V_{OC} とフィルファクタ (FF) については Si PV よりも DSC の方がかなり高く保たれている。その結果、DSC では低照度条件でも電力変換効率 PCE の値を高く保つことができ、Si PV よりも優位な結果になっているものと考えられる。

これらの結果から、低照度領域においては結晶 Si PV に比べて DSC が優位であることを確認できたが、a-Si の中でも最も高性能と言われているアモルトンを上回る結果を得ることはできなかった。

本研究で検討した内容をさらに進めて、使用環境に即した性能評価法の確立に取り組んでいき、近い将来 DSC がアモルトンと同等の性能を得られるよう開発の支援に繋がっていきたいと考えている。

(a) J_{sc} と照度の関係(b) V_{oc} と照度の関係

(c) フィルファクターと照度の関係



(d) 変換効率 PCEと照度の関係

図 3-7-2 本研究で開発した LED 光照射装置 (Iris-S T2500) と
ソーラーシミュレータを使用して測定した様々な照度での発電性能

3-8 まとめ

室内環境下での照度測定において、交流周波数に起因する揺らぎについて明らかにし、適切な測定法を提案した。また、交流電源で駆動される光源下での I-V 測定において、測定条件によっては偶然が支配し再現性の低い結果になり得ることを示し、その解決法を示した。

交流電源に起因する揺らぎを排除するため、安定直流電源を用いた LED 光源および、光源と組み合わせる測定用暗箱を作製し、太陽電池用低照度評価装置の試作品を作製した。この装置は照度の時間安定性および面内均一性に優れ、電流調整と高さ調整により任意の照度を得ることができる。なお、この装置は実用新案出願済みである。

安定直流電源を用いた LED 光源と交流で駆動される照明器具の放射照度を精度良く測定し、双方の放射照度を合わせれば、安定した光源で室内環境と同等の性能評価が実施できることを示した。

作製した光源を使用して各種太陽電池の照度-変換効率関係を検証し、装置の有効性を確認することができた。

第 4 章 ペロブスカイト太陽電池の発電性能評価

4-1 はじめに

近年、有機系太陽電池の一つであるペロブスカイト太陽電池（Perovskite Solar Cell 以下、PSC と表記）の光電変換効率が急激に向上し非常に注目されている。宮坂ら（桐蔭横浜大学教授）により世界で初めて開発された PSC[7]は、ペロブスカイト結晶薄膜を金属酸化物（チタニア、アルミナ）の多孔膜上に溶液塗布することで形成され、800nm までの可視光をバンドギャップ吸収によって集光し、その上層に有機正孔輸送材料を接合した薄膜セルは高い電圧（ $> 1V$ ）を出力する。PSC は溶液塗布によって作ることができるためインクジェットや塗工機などでの製造が検討されており、大面積化と低コスト化とを両立できる次世代の太陽電池として期待されている。KISTEC も 2015 年度から開始した NEDO の研究 PJ に参画し、性能評価法開発を進めることとなった。

PSC は図 1 に示すように大きく 3 つのタイプに分けられる。他研究機関から提供された PSC に対し I-V 測定を実施した例を図 4-1-2 に示す。ナノ構造型と平面ヘテロ接合型について測定を行ったが、どちらも非常に大きなヒステリシスを有するものであった。

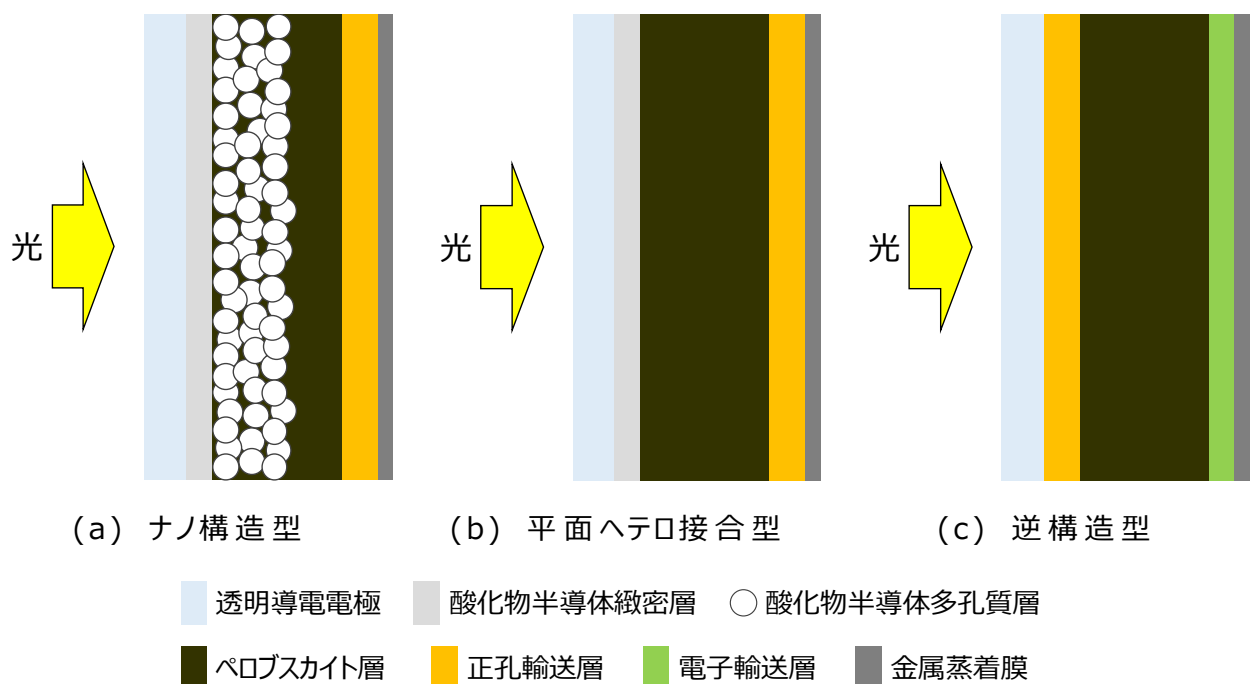
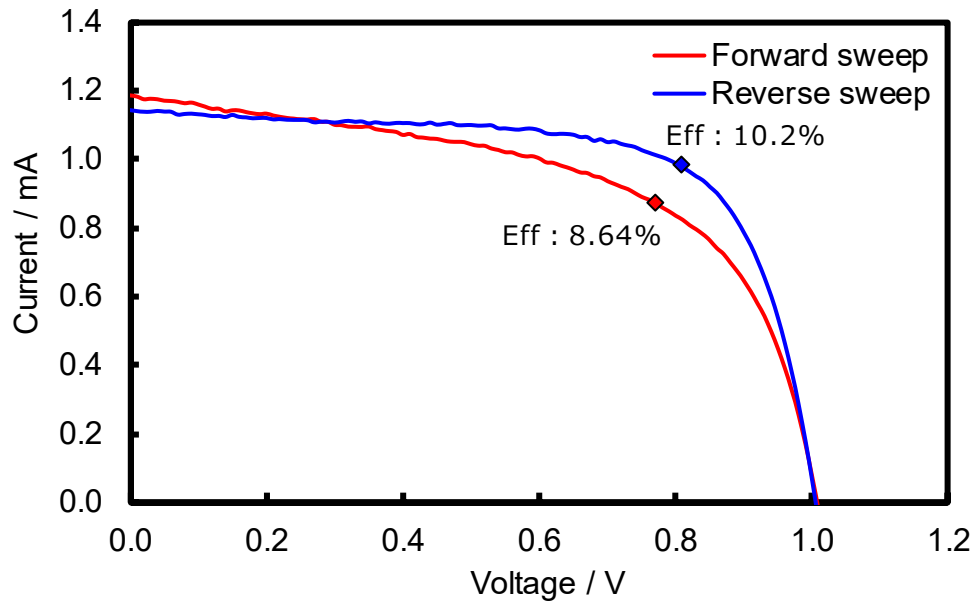
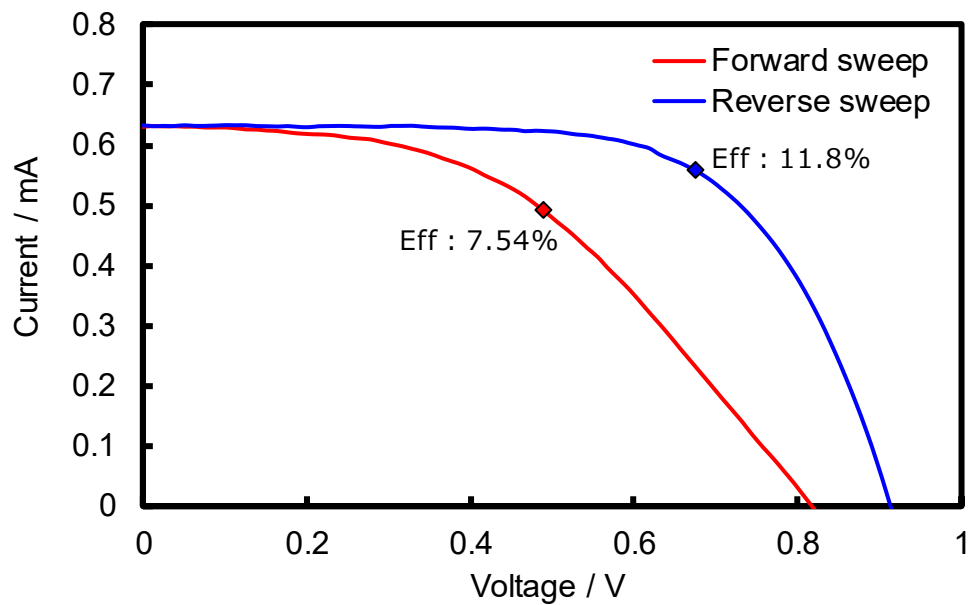


図 4-1-1 ペロブスカイト太陽電池の構造

DSC と同様、c-Si PV を測定する場合の条件では再現性の高い測定は不可能と判断し、PSC に最適化した性能評価技術を開発するため検討に着手した。



(a) ナノ構造型における結果



(b) 平面ヘテロ接合型における結果

図 4-1-2 PSC の I-V 測定結果例
(グラフ上の◆は最大出力点)

4-2 環境制御試験槽と搬送容器の作製

現在、実験室レベルでの PSC 作製はスピコートによる溶液塗布が主である。また、DSC と異なり、未封止でも発電できるため、グローブボックスやドライルームで作製後にその環境を保持したまま性能評価に供している例が多い。各研究機関で作製された PSC を KISTEC で評価するためには不活性雰囲気で保管したまま移送することが適切と考え、不活性雰囲気保管と大気保管の経時変化について比較を行った。

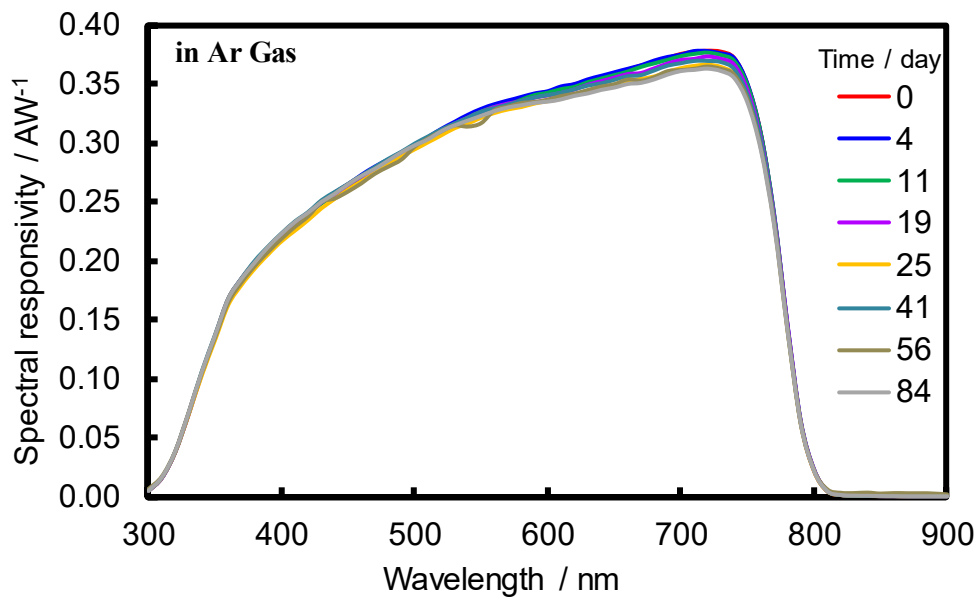
図 4-2-1 に示すように上面に石英ガラスを配置した小型の密封容器を作製し、作製現場にて PSC を容器内に固定した後、不活性ガスを封入して移送した。移送後は定期的に不活性ガスを追加しながら保管し、長期間にわたり分光感度測定を実施した。測定時以外は光を当てないよう容器を暗幕で包んで保管した。一方、比較用試料は通常はデシケーター内にアルミホイルで包んで保管し、測定時だけ取り出すという手順にて実験を進めた。結果を図 4-2-2 に示す。

図に示す通り、不活性ガス（この例では Ar）中で保管したものは未封止にもかかわらず、僅かな変化にとどまった。しかし、大気保管したセルについては時間経過とともに分光感度が低下していくことが明らかとなった。

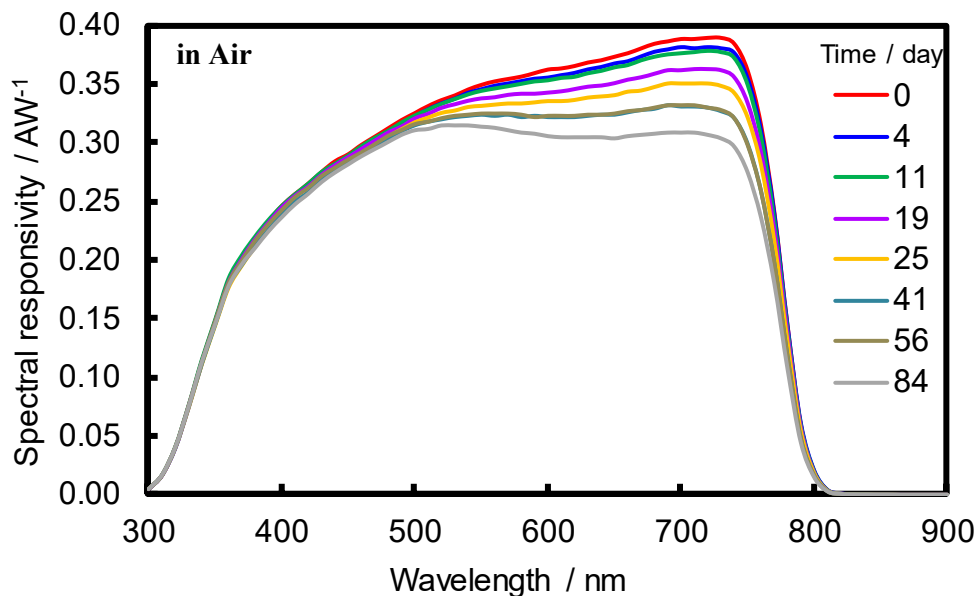


図 4-2-1 性能評価用小型密封容器

この結果から、PSC の性能低下の要因として大気に含まれる酸素や水分等の影響 [32] がある一方で、不活性ガス中で保管すれば他機関からの移送が可能なことと長期間の測定に耐えられることが明らかとなった。また、大気保管されたセルの分光感度が相似形で低下していくのではなく、500～750nm の範囲のみ低下していることから内部構造が変化していることが予想された。この点に関しては今後機器分析と並行して検討を進めていく予定である。



(a) 不活性雰囲気中で保管した PSC の分光感度



(b) 大気中で保管した PSC の分光感度

図 4-2-2 分光感度の経時変化

不活性ガス中で保管した状態での移送および長期保管が可能となったため、第二段階として複数個のセルを移送・保管・測定できる体制作りに着手した。図 4-2-3 にステンレス鋼で作製された搬送容器を示す。容器裏面にはガスを導入・排出するためのバルブが取り付けられている。一方、試験槽は市販のグローブボックスに追加加工を施し、試験温度、酸素濃度、湿度等の雰囲気積極的に制御した状態で光照射ができるような装置を作製した。図 4-2-4 に装置の外観を示す。この試験槽はグローブを装着した状態でも容易に取り扱えるよう配線はワンタッチソケットを、位置決めはスライドレールを使用している。

この搬送容器と試験槽を使用して測定した結果を図 4-2-5 に示す。このセルは搬送に 3 時間程度費やしたが試験槽導入時に酸素濃度および湿度の上昇が確認されなかったため、3 時間程度の移動であれば充分対応できることが明らかとなった。測定は 5 回連続で行い、その後光照射しない状態で試験槽内に保管し、翌日（週末の場合は翌週）同じ条件で再度測定という実験を繰り返した。毎日一回目の測定結果が高く、その後低下していく傾向が確認できたが翌日になると元に戻っているため、これは劣化ではなく「一時的な性能低下」であると考えている。この性能低下が何に起因するのかは現在検討中である。



図 4-2-3 搬送用密封容器

また、21～25 回目の測定のように全体に低い値を示す日もあるが、これはセル裏面の金電極が薄いために起こる接触不良と推察され、このような現象は複数のセルにおいて確認された。



図 4-2-4 グローブボックスに追加加工を施した環境制御試験槽

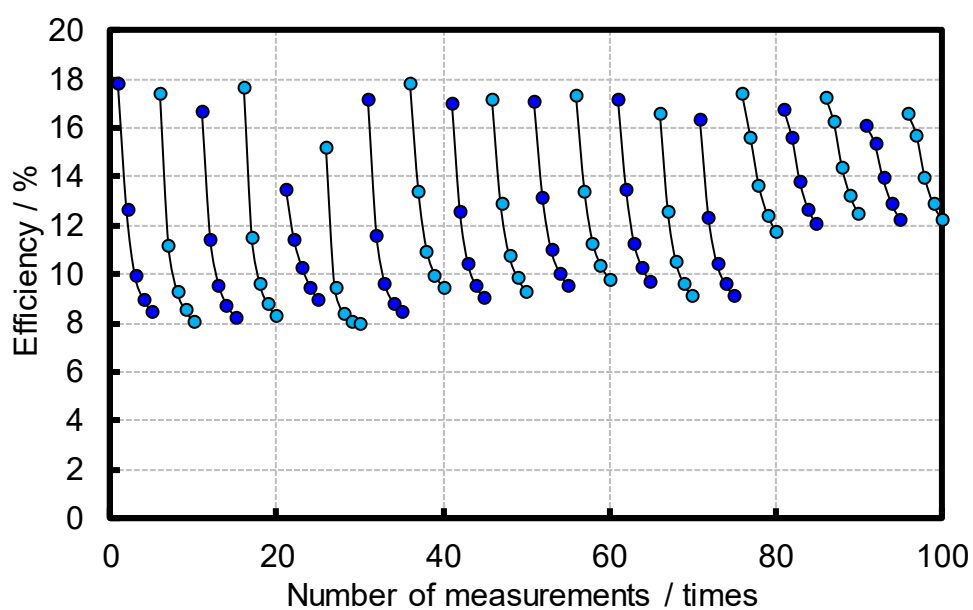
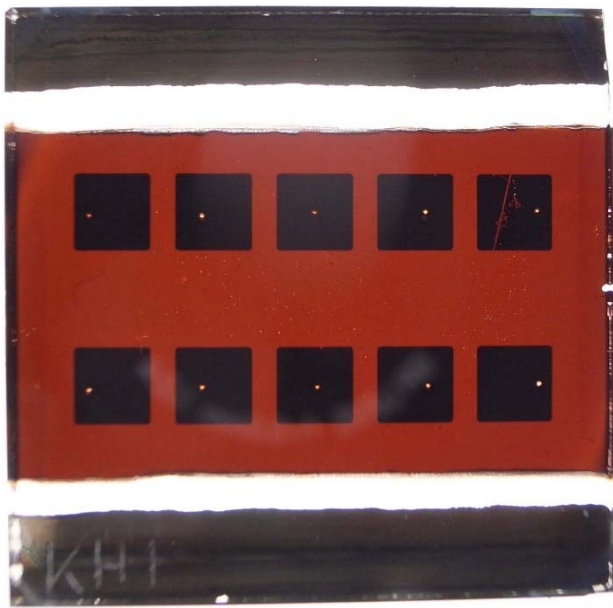
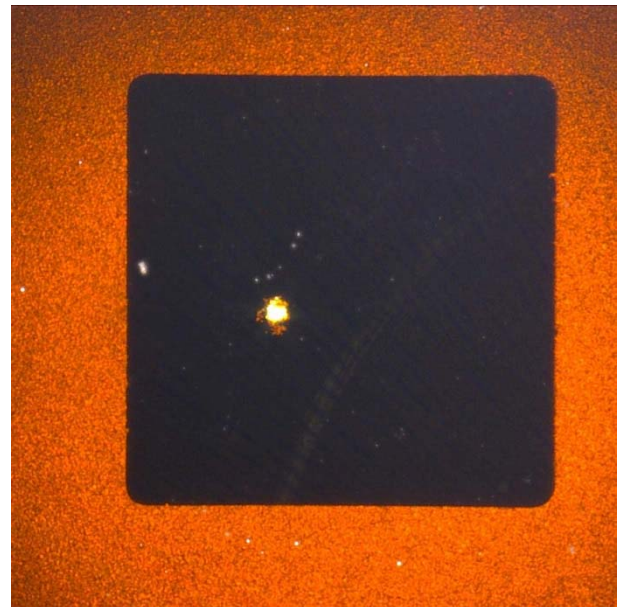


図 4-2-5 長期間連続測定で得られた変換効率 Eff の値
(試験開始から 53 日間の結果)

さらに、別のセルにおいては長期間測定中にバネ端子が金電極を貫通した例も見られた（図 4-2-6 参照）。このような問題に対し、現在では電極とほぼ同じ大きさに切断したインジウム箔をバネ端子との間に挟み、金電極を保護するような方法を採用している。インジウム箔は軟らかく金電極に密着して下向きにしても落ちないため使い勝手が非常に良い。インジウムより抵抗値の低い銀や銅も試したが、硬いため密着が悪くむしろ接触不良を招く結果となった。インジウム箔を挟み込むことで、改善は見られたが接触不良が完全に解決されたわけではないため、今後はインジウム箔の厚さについても検討を継続していく予定である。



(a) セル全体



(b) 電極の拡大

図 4-2-6 長期間測定の中に金電極が破損した例

4-3 マルチチャンネル同時測定ソースメーターの作製

PSC は光が当たっている部分からのみ発電する特徴があるため、マスクで分割できれば一枚の基板内に複数のセルを作製することが可能である。図 4-3-1 に示したものは 12.5mm 角の基板を使用して裏面金電極を 3 本蒸着した例である。このセルであれば 3 箇所から同時に発電するが、従来の方法では 1 箇所ずつしか測定できないため全部のセルを評価するためには 3 倍の時間が掛かることになる。この他にも研究機関によって 4 セル、6 セル、10 セルなどが作製されている。測定時間を延ばすことなく n 数を増やすことを実現させるため、多チャンネルを同時に測定できるソースメーターがあれば研究の進展に寄与できると考え、多チャンネル同時測定可能なソースメーターを試作した。このソースメーターも低照度評価装置と同様セルシステム社に作製を依頼した。

ソースメーターの仕様を検討している時期は PJ 内において 3 セル/枚の PSC を作製している機関が比較的多かったため、これを同時に 4 枚測定できるようチャンネル数を 12 とした。図 4-3-2 にソースメーターの外観を示す。

図 4-3-3 は一枚に 3 セル搭載されたナノ構造型 PSC 4 枚に対し 70 回連続で I-V 測定を行った結果である。なお、このセルは 25mm 角のガラス基板にペロブスカイト層を形成した後 4 分割し、各 3 本ずつ金電極を蒸着したものである。(a) は 70 回のうち最初の 1 回目・順掃引のみを抜粋したもの、(b) は 70 回連続測定中の短絡電流 I_{SC} の経時変化を記録したものである。

(a) の I-V 曲線を見ると、ch 1 と ch 12 の性能が低く、ほぼ同じ曲線を描いていることが判る。この 2 点は (b) の I_{SC} 経時変化においても同じような挙動を見せている。それとは逆に、ch 2, 4, 9 は I-V 曲線、 I_{SC} とともに高い値を示している。このことは、ペロブスカイト層の面内に性能分布があることを示唆している。

ch 3 は全くデータを取れなかったが、これは電極とバネ端子の接触不良によるものと推察される。接触不良を起こさないような試料の固定方法を検討しなければならないが、ソースメーター自体は正常に機能し、1 回分の測定時間で 12 セルを測定できることが確認できた。

なお、この 12ch 同時測定ソースメーターは特許（名称：電流電圧測定システム及び電流電圧測定方法，出願番号：2016-57127，公開番号：2017-175714）として出願済みである。

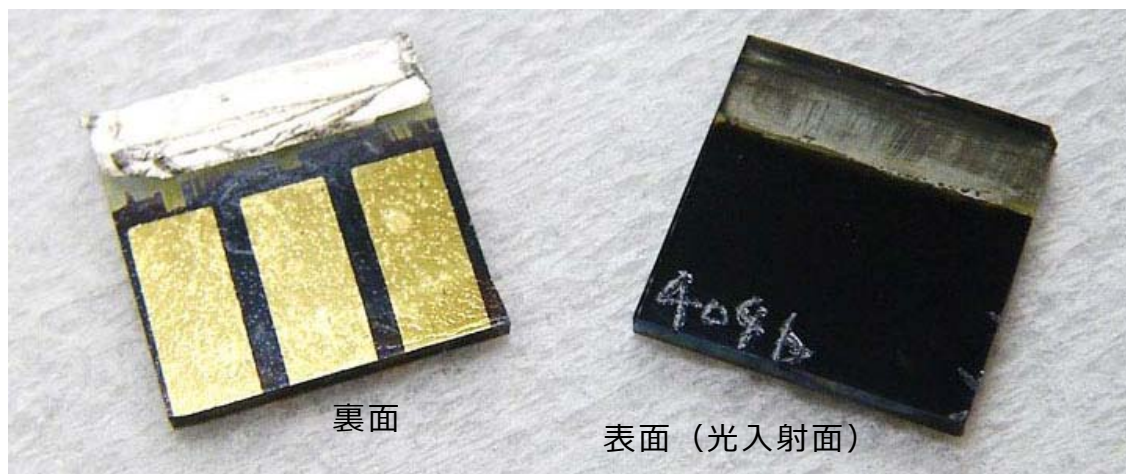


図 4-3-1 PSC の外観（3 セルの例）

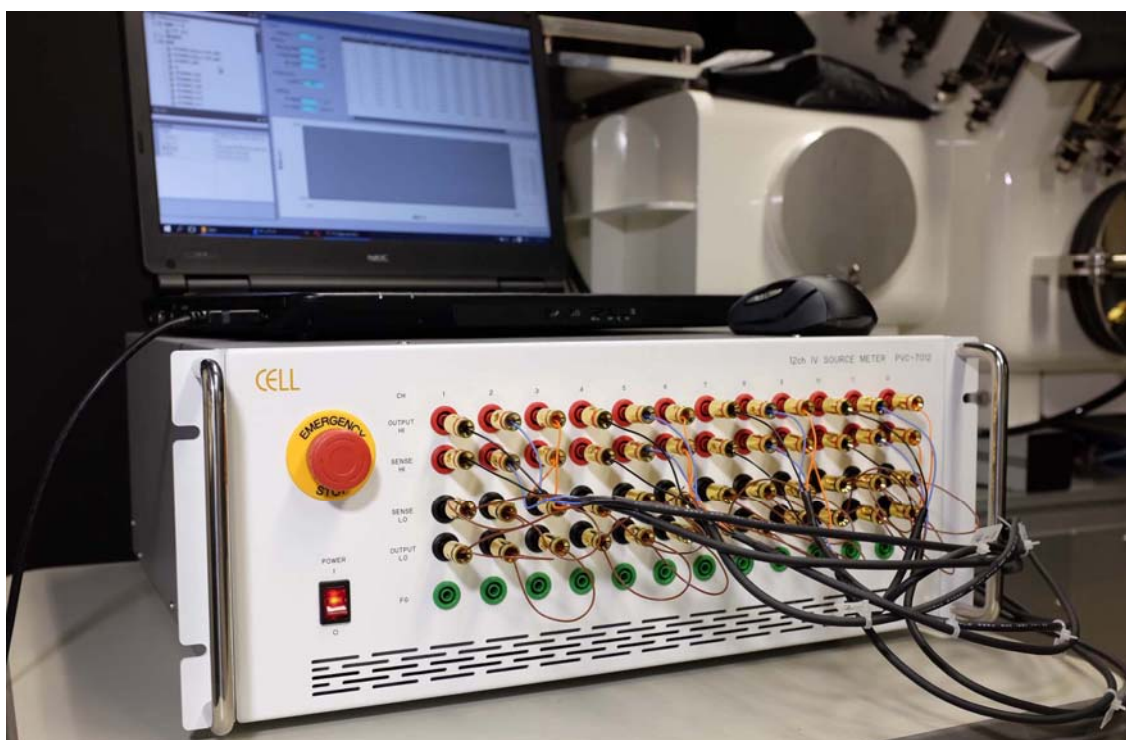
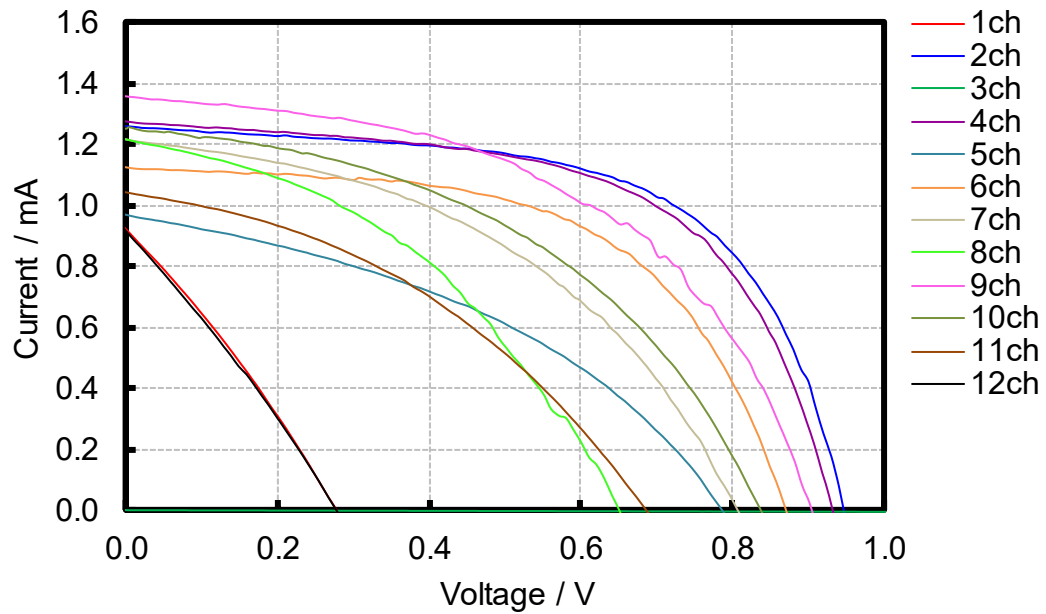
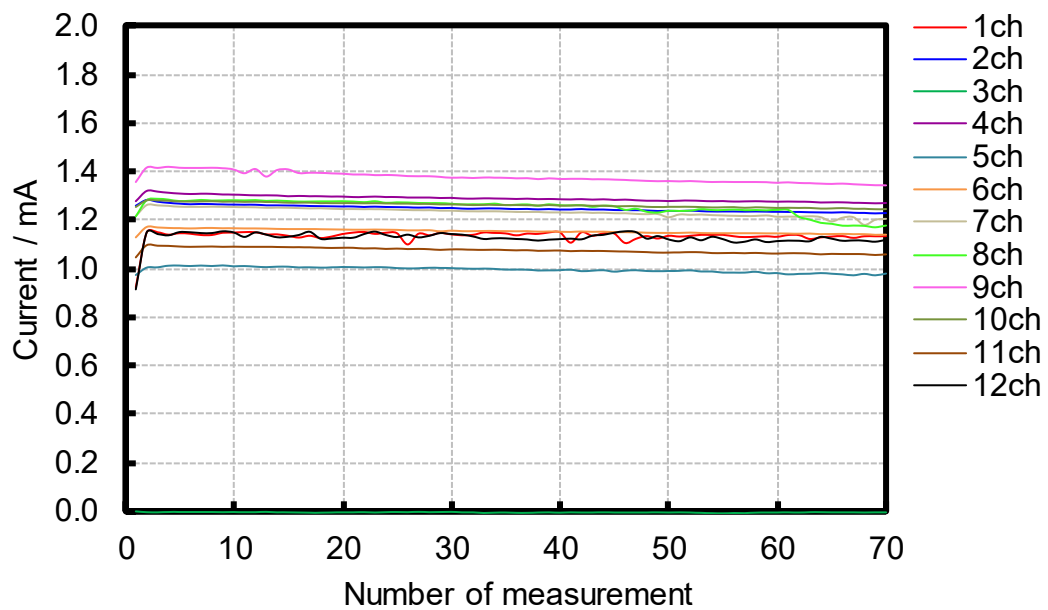


図 4-3-2 マルチチャンネル同時測定ソースメーターの外観



(a) 70 回測定 の 1 回目・順掃引のみ抜粋したもの



(b) 70 回連続測定中における I_{SC} 値の変化
(順掃引のみ抜粋したもの)

図 4-3-3 12ch 同時に I-V 測定を連続 70 回行った結果
(被測定セルはナノ構造型 PSC)

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2017-175714

(P2017-175714A)

(43) 公開日 平成29年9月28日 (2017.9.28)

(51) Int. Cl.

H02S 50/10 (2014.01)
G01R 31/26 (2014.01)

F 1

H02S 50/10
G01R 31/26

F

テーマコード (参考)

2G003
5F151

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2016-57127 (P2016-57127)
(22) 出願日 平成28年3月22日 (2016.3.22)

(出願人による申告) 平成27年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/革新的新構造太陽電池の研究開発/ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発」委託事業、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 591243103
公益財団法人神奈川科学技術アカデミー
神奈川県川崎市高津区坂戸3丁目2番1号

(71) 出願人 514315274
株式会社セルシステム
神奈川県横浜市青葉区あざみ野南1-2-8

(74) 代理人 100103894
弁理士 家入 健

(72) 発明者 斎藤 英純
神奈川県川崎市高津区坂戸3丁目2番1号
公益財団法人神奈川科学技術アカデミー内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電流電圧測定システム及び電流電圧測定方法

(57) 【要約】

【課題】複数の太陽電池の I-V 測定の精度を向上させること。

【解決手段】 I-V 測定システム 100 は、試料ホルダ 10、測定装置 30 及びデータ処理装置 50 を有する。試料ホルダ 10 は、複数の太陽電池を保持する。測定装置 30 は、複数の太陽電池に光が照射されることで生じる、複数の太陽電池の電流及び電圧を並行して測定し、測定結果を測定データとして出力する。データ処理装置 50 は、測定データに基づいて、複数の太陽電池で生じた電圧と電流との関係を決定する。

【選択図】 図 1

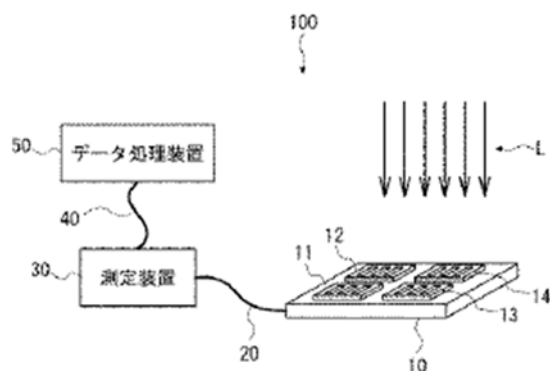


図 4-3-4 公開特許公報 (抜粋)

4-4 まとめ

未封止のPSCに対し、不活性ガスと大気中における性能評価を実施し、大気中の酸素、水分などが劣化の原因になることを示した。また、不活性ガスで満たした搬送用密封容器を使用すれば、遠距離の研究機関が作製したPSCでも変質することなく測定に供せることを示した。

酸素および水分量を制御できる環境制御試験槽を作製し、未封止のPSCに対し長期間の測定を実施できることを示した。さらに、12ch同時測定可能なソースメーターを作製し、測定のn数向上が可能なことを示した。なお、この装置は特許出願済である。

第 5 章 結論および今後の展望

5-1 結論

1. 分光感度測定において、単色光強度を段階的に変化させた場合のイオン液体セルの電流応答は、イオン液体に含まれる I_3^- の拡散速度が遅いため、有機溶媒セルよりも遅いことが判明した。
2. 分光感度測定において、定常状態になった短絡電流値を得るために測定時間を十分な長さに調整すると、有機溶剤セルだけでなく、イオン液体セルにも短絡電流と光強度との間に直線的な関係を確認することができた。
3. DSC の分光感度は、各波長における電流値が定常状態になるよう適切に設定されたチョッピング周波数であれば、ASTM E1021 による従来の AC 法を用いて測定することができる。しかし、DSC の分光感度はシリコン太陽電池とは異なり、バイアス光強度で変化するので注意が必要である。従って、実際の使用環境と同様の光照射条件で測定を行う必要がある。
4. 分光感度測定（DC 法）は、異なるバイアス光源を使用することに起因する誤差を排除することができるため、異なる機関で作製された DSC の分光感度を比較するのに有用であることが判明したが、実際の条件下で適用することはできない。
5. 室内環境下での照度測定において、交流電源周波数に起因する揺らぎについて明らかにし、実測例を示し、改善案を提案した。
6. 交流電源で駆動される光源下での I-V 測定において、測定条件によっては偶然性の支配する結果になり得ることを示し、その解決法を示した。
7. パルス調光 LED 照明器具を使用した場合の I-V 測定を行ったが、通常の照明器具を使用したときのように変動を収束させることができず、揺らぎの影響が若干残った結果となった。この点に関しては今後検討を続けていく予定である。

8. 交流電源に起因する揺らぎを排除するため、安定直流電源を用いた LED 光源および、この LED 光源と組み合わせる測定用暗箱を作製し、太陽電池用低照度評価装置の試作品を作製した。この装置は照度の時間安定性および面内均一性に優れ、電流調整と高さ調整により任意の照度を得ることができる。なお、この装置は実用新案出願済みである。
9. 安定直流電源を用いた LED 光源と交流で駆動される照明器具の放射照度を精度良く測定し、双方の放射照度を合わせれば、安定した光源で室内環境と同等の性能評価が実施できることを示した。
10. 作製した光源を使用して各種太陽電池の照度-変換効率関係を検証し、装置の有効性を確認することができた。
11. 未封止の PSC に対し、不活性ガスと大気中における性能評価を実施し、大気中の酸素、水分などが劣化の原因になることを示した。
12. 不活性ガスで満たした搬送用密封容器を使用すれば、遠距離の研究機関が作製した PSC でも変質することなく測定に供せることを示した。
13. 酸素および水分量を制御できる環境制御試験槽を作製し、未封止の PSC に対し長期間の測定を実施できることを示した。
14. 12ch 同時測定可能なソースメーターを作製し、測定の n 数向上が可能なことを示した。なお、この装置は特許出願済みである。

5-2 今後の展望

本研究で試作した低照度室内光シミュレータ、一般照明機器の照度測定手順、照明機器下における I-V 測定手順、調光 LED の照度測定手順などを整理し、「室内環境における太陽電池性能評価法」として確立させ、太陽電池の室内用途開拓の支援を進めていきたいと考えている。

特に今後急速に普及が進むと予想される調光型 LED に対する評価基準の確立を最優先で進めたいと考えている。

また、近年注目されている PSC の性能評価をさらに進め、耐久性評価を含めた評価法を確立させたいと考えている。

参考文献

- [1]. 環境省ホームページ, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2020.html>
- [2]. 環境エネルギー政策研究所ホームページ, <https://www.isep.or.jp/archives/library/10930>
- [3]. C. López-López, S. Colodrero, M. E. Calvo, and H. Míguez, *Energy Environ Sci.*, 6, 1260 (2013).
- [4]. M. Kawaraya, T. Toyoda, S. Doi, D. Kitazawa, H. Saito, H. Segawa, and K. Takagi, *Proceedings of International Conference Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics 2018 (AP-HOPV18)*, poster 141 (2018).
- [5]. 日立製作所ホームページ, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/11/1109.pdf>
- [6]. 瀬川浩司, 内田 聡 編集, 色素増感太陽電池のモジュール化・材料開発・評価技術, 技術教育出版, 254, (2010)
- [7]. A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, *J. Am. Chem. Soc.* 131, 6050 (2009).
- [8]. NREL, Best Research-Cell Efficiencies, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf>
- [9]. JEITA, ET-9101, 屋内光下での太陽電池の性能評価法, 2016-3.
- [10]. 斎藤英純, 青木智子, 青木大輔, 高木克彦, 有機太陽電池の特性と標準化に向けて, 機能材料 vol. 31, No. 22, 55, (2011)
- [11]. 宮坂 力, 瀬川浩司 編集, ペロブスカイト薄膜太陽電池の開発と最新技術, 技術教育出版, 205, (2014)
- [12]. 原浩二郎, 猪狩真一, 高野真悟, 藤橋岳, 色素増感太陽電池の光電変換特性評価方法, *Electrochemistry*, 73(10), 887-896, (2005)
- [13]. F. Cao, G. Oskam, G. J. Meyer, and P. C. Searson, *J. Phys. Chem.*, 100, 17021 (1996).
- [14]. P. M. Sommeling, H. C. Rieffe, J. M. Kroon, J. A. M. van Roosmalen, A. Schönecker, and W. C. Sinke, *Proceeding of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1816 (1997).
- [15]. P. M. Sommeling, H. C. Rieffe, J. A. M. van Roosmalen, A. Schönecker, J. M. Kroon, J. A. Wienke, and A. Hinsch, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 62, 399 (2000).
- [16]. T. Trupke and P. Würfel, *J. Phys. Chem. B*, 104, 11484 (2000).
- [17]. J. Hohl-Ebinger, A. Hinsch, R. Sastrawan, W. Warta, and U. Würfel, *Proceeding of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, p.173 (2004).

-
- [18]. L. J. Diguna, M. Murakami, A. Saito, Y. Kumagai, T. Ishihara, N. Kobayashi, Q. Shen, and T. Toyoda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 45, 5563 (2006).
- [19]. J. Halme, G. Boschloo, A. Hagfeldt, and P. Lund, *J. Phys. Chem. C*, 112, 5623 (2008).
- [20]. H. Tian, L. Liu, B. Liu, S. Yuan, X. Wang, Y. Wang, T. Yu, and Z. Zou, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42, 045109 (2009).
- [21]. X-Z. Guo, Y-H Luo, Y-D Zhang, X-C Huang, Dong-Mei Li, and Q-B Meng, *Rev. Sci. Instrum.*, 81, 103106 (2010).
- [22]. 荒川裕則 監修, 色素増刊太陽電池の最新技術 II, シーエムシー出版, 162-169, (2007)
- [23]. ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2.
- [24]. S. Yanagida, 応用物理, 73, 1509 (2001).
- [25]. K. Schwarzburg and F. Willig, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 2520 (1991).
- [26]. P. E. de Jongh and D. Vanmaekelbergh, *J. Phys. Chem. B*, 101, 2716 (1997).
- [27]. Q. Wang, J-E Moser, and M. Grätzel, *J. Phys. Chem. B*, 109, 14945 (2005).
- [28]. F. Fabregat-Santiago, Juan Bisquert, E. Palomares, L. Otero, D. Kuang, S. M. Zakeeruddin, and M. Grätzel, *J. Phys. Chem. C*, 111, 6550 (2007).
- [29]. ASTM, 2007 Nuclear Energy (II), Solar and Geometry Energy, ASTM Vol. 12.02, E1021-06.
- [30]. Chia-Yuan Chen et al., *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 1824 (2017)
- [31]. IEC 60904-9, Solar simulator performance requirements, Edition 2.0, 2007-10.
- [32]. 山本晃平, ペロブスカイト太陽電池の高性能化に向けた新規作製手法の研究開発, 金沢大学大学院自然科学研究科博士論文, 36 (2018)

発表論文

1. Hidenori SAITO, Daisuke AOKI, Shinichi MAGAINO, Katsuhiko TAKAGI, and Shuzi HAYASE
Performance evaluation method of organic photovoltaics under indoor light condition.
Electrochemistry, 86 (6), 1-8, (2018).

参考論文

Daisuke AOKI, Tomoko AOKI, Hidenori SAITO, Shinichi MAGAINO, and Katsuhiko TAKAGI
Methods for Spectral Responsivity Measurements of Dye-Sensitized Solar Cells
Electrochemistry, 80 (9), 640-646, (2012).

学会発表

1. 再現性の高いペロブスカイト太陽電池の性能評価法に関する検討
2016 年光化学討論会, 東京大学駒場第一キャンパス, 9/6-8, (2016), 1A22
斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信一, 高木克彦
2. ペロブスカイト太陽電池の性能評価法の開発
日本化学会第 97 春期年会, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 3/16-19, (2017), 3A6-46
斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信一, 高木克彦
3. ペロブスカイト太陽電池の性能評価法に関する検討 (複数の手法による比較)
電気化学会第 85 回大会, 東京理科大学葛飾キャンパス, 3/9-11, (2018), 3Q11
斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信一, 高木克彦, 早瀬修二

国際会議

1. Photoelectric conversion performance, stability and durability evaluation of Perovskite solar cell performance under the controlled atmosphere conditions. ASIA-PACIFIC HYBRID AND ORGANIC PHOTOVOLTAICS CONFERENCE (AP-HOPV2018)

Kitakyushu International Conference Center, Fukuoka, Japan, 1/28-30 (2018) , 094

Hidenori SAITO, Daisuke AOKI, Shinichi MAGAINO, Katsuhiko TAKAGI, and Shuzi HAYASE

2. OPTIMIZATION OF PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR PEROVSKITE SOLAR CELL.

The Grand Renewable Energy 2018 (GRE2018)

PACIFICO YOKOHAMA, Yokohama, Japan, 6/17-22 (2018) ,a90736

Hidenori SAITO, Daisuke AOKI, Shinichi MAGAINO, Katsuhiko TAKAGI and Shuzi HAYASE

特許および実用新案

特許

発明の名称：電流電圧測定システム及び電流電圧測定方法

出願番号：特願 2016-57127 号

公開番号：特開 2017-175714

出願日：平成 28 年 3 月 22 日（2016.3.22）

発明者：斎藤 英純, 渡 脩, 田村 裕

実用新案

考案の名称：太陽電池の評価装置

出願番号：実願 2016-183

登録番号：実用新案登録第 3203433 号

出願日：平成 28 年 1 月 15 日（2016.1.15）

登録日：平成 28 年 3 月 9 日（2016.3.9）

考案者：斎藤 英純

謝 辞

本論文を纏めるにあたり、ご指導とご鞭撻を賜りました九州工業大学大学院生命体工学研究科 早瀬修二教授に心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり多大な御助言を戴きました KISTEC 顧問 馬飼野信一博士と前 KAST 研究顧問 高木克彦名古屋大学名誉教授に感謝いたします。

FIRST-PG 開始に伴い、太陽電池評価の業務に携わる機会を与えて戴いた藤嶋 昭元 KAST 理事長（前東京理科大学学長）と東京大学先端科学技術研究センター瀬川浩司教授に感謝いたします。

多くのご助言を戴き、さらには評価用の太陽電池を提供して戴きました御国色素株式会社 瓦家正英博士に感謝いたします。

この研究を支援してくださった阿久津康久 KISTEC 川崎技術支援部長はじめ職員の方々に感謝いたします。

特に太陽電池評価 Gr. 青木大輔研究員には大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

なお、この研究に使用した機器の多くは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成により導入したものです。関係各位に感謝の意を表します。

2018 年 10 月